



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Modelamiento y Simulación de la Dispersión de una Mezcla  
de Contaminantes Orgánicos e Inorgánicos en un Río.**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Ambiental

**AUTORES:**

Cerna Mendez, Katherin Kei (ORCID: 0000-0001-8549-9020)

Rodríguez Pacheco, Mary Juana (ORCID: 0000-0002-5136-1266)

**ASESOR:**

Mgtr. Reyna Mandujano, Samuel Carlos (ORCID: 0000-0002-0750-2877)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA — PERÚ

2021



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de tesis a nuestras madres que nos apoyan constantemente, con su cariño y paciencia, nuestros hermanos, familiares tan queridos que nos brindan mucha fuerza y valentía para seguir adelante y superarnos cada día más, nos incentivan para ser mejor personas, dedicándonos momentos gratos y muy especiales.



## AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis primeramente nos gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirnos y llegar hasta donde hemos llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A la UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO por darnos la oportunidad de ser profesionales.

Al asesor de tesis, por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en nosotros poder terminar la investigación con éxito.

Al Ingeniero Luis Carrasco Venegas e ingeniera Luz Castañeda Pérez, por sus grandes aportes y tiempo que nos han dado, para desarrollar esta investigación.

Son muchas las personas que han formado parte de nuestras vidas, a las que nos encantaría agradecerles por su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de nuestras vidas. Algunas están aquí con nosotros y otras en nuestros recuerdos y en el corazón, sin importar en donde estén darles las gracias por formar parte de nosotros, por todo lo que nos han brindado y por todas sus bendiciones.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CARÁTULA

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT .....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	5
III. METODOLOGÍA.....	20
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	21
3.2. Variables y Operacionalización.....	22
3.3. Población (criterios de selección), muestra, muestreo, unidad de análisis .....	24
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	24
3.5. Procedimientos.....	25
3.6. Método de análisis de datos.....	42
3.7. Rigor científico .....	42
3.8. Aspectos éticos .....	42
IV. RESULTADOS .....	43
V. DISCUSIÓN.....	63
VI. CONCLUSIONES.....	67
VII. RECOMENDACIONES.....	70
REFERENCIAS .....	72
ANEXOS.....	77



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de los parámetros empíricos para coeficiente de reareación.....	28
Tabla 2: Ecuaciones de las tasas de reaireación.....	30
Tabla 3. Ecuaciones de las tasas de desoxigenación .....	36
Tabla 4: El coeficiente de dispersión longitudinal.....	39
Tabla 5: Concentración de DBOC en función a la distancia y el tiempo de dispersión. ....	46
Tabla 6: Concentración de DBON en función a la distancia y el tiempo de dispersión.....	48
Tabla 7: Concentración de la sustancia inorgánica en función a la distancia y el tiempo de dispersión.....	50
Tabla 8: Déficit de oxígeno en función a la distancia y el tiempo de dispersión. ....	52
Tabla 9: Concentración de DBOC en función a la distancia y el tiempo de dispersión .....	54
Tabla 10:Concentración de DBON en función a la distancia y el tiempo de dispersión .....	56
Tabla 11: Concentración de la sustancia inorgánica en función a la distancia y el tiempo de dispersión.....	58
Tabla 12: Déficit de oxígeno en función a la distancia y el tiempo de dispersión.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismos de interacción en el balance de OD.....	13
Figura 2: Perfil esquemático de zonas autolimpiables .....	14
Figura 3: Diagrama de flujo para la obtención de Pasta Básica de Cocaína.....	17
Figura 4: Proceso de ingreso y salida de datos .....	25
Figura 5: Perfil de concentración de la DBOC en función al tiempo y la distancia-NP .....	47
Figura 6: Perfil de concentración de la DBON en función al tiempo y la distancia-NP .....	49
Figura 7: Perfil de concentración de MI en función al tiempo y la distancia-NP.....	51
Figura 8: Perfil de déficit de oxígeno en función al tiempo y la distancia-NP.....	53
Figura 9: Perfil de concentración de la DBOC en función al tiempo y la distancia-P .....	55
Figura 10: Perfil de concentración de la DBON en función al tiempo y la distancia-P .....	57
Figura 11: Perfil de concentración de MI en función al tiempo y la distancia-P .....	58
Figura 12: Perfil de déficit de oxígeno en función al tiempo y la distancia-P.....	61

### ÍNDICE DE ABREVIATURAS

DBO	:	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DBOC	:	Demanda bioquímica de Oxígeno carbonácea
DBON	:	Demanda bioquímica de Oxígeno Nitrogenada
MI	:	Materia inorgánica
MINAGRI	:	Ministerio de Agricultura
NP	:	No Permanente
OMS	:	Organización Mundial de Salud
OD	:	Oxígeno Disuelto
PBC	:	Pasta Básica de Cocaína
P	:	Permanente

## RESUMEN

Cuando un contaminante ingresa a un cuerpo de agua superficial, se llevan a cabo una serie de procesos de transporte que deben ser estudiados con el fin de predecir el comportamiento del contaminante y los probables impactos generados en el medio acuático. En la presente investigación, se ha realizado el modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes vertido en un río de flujo turbulento. Se consideraron las características hidrodinámicas del río, se elaboró un modelo matemático, cuyo desarrollo implica la resolución de ecuaciones diferenciales parciales para la evaluación de las concentraciones de los contaminantes mediante el uso de herramientas numéricas. Este modelo evalúa la concentración de contaminante que se dispersa por difusión turbulenta, advección y reacción mediante el uso de las ecuaciones de conservación de masa y flujo de fluidos. Se ha utilizado el modelo de Streeter y Phelps modificado; para su resolución se utilizó el software Polymath. Se presentan los resultados de la simulación, las mismas que se expresan en forma de perfiles de concentración vs tiempo para cada longitud, y a la vez, la concentración vs la distancia para cada tiempo, tanto para un ingreso tipo pulso como para un ingreso permanente de contaminante. Para el primer caso se obtiene una familia de curvas de distribución gaussiana; mientras que en el segundo caso se obtienen curvas hiperbólicas. En conclusión, se ha logrado modelar el proceso de desoxigenación como consecuencia de la carga orgánica carbonácea y nitrogenada, materia inorgánica y déficit de oxígeno. Se recomienda utilizar el programa para un trabajo experimental, ya que está desarrollado para predecir resultados a partir de datos experimentales preliminares como régimen de flujo y caudal.

**Palabra clave:** modelamiento matemático, dispersión, Streeter Phelps.





### **ABSTRACT**

When a pollutant enters a surface water body, a series of transport processes are carried out that must be studied in order to predict the behavior of the pollutant and the probable impacts generated in the aquatic environment. In the present investigation, the modeling and simulation of the dispersion of a mixture of pollutants discharged into a turbulent flow river has been carried out. The hydrodynamic characteristics of the river were considered, a mathematical model was elaborated, whose development implies the resolution of partial differential equations for the evaluation of the concentrations of the pollutants through the use of numerical tools. This model evaluates the pollutant concentration that is dispersed by turbulent diffusion, advection and reaction by using the equations of conservation of mass and fluid flow. The modified Streeter and Phelps method has been used; Polymath software was used for its resolution. The results of the simulation are presented, which are expressed in the form of concentration vs. time profiles for each length, and at the same time, the concentration vs. the distance for each time, both for a pulse type entry and for a permanent entry of pollutant. For the first case a family of Gaussian distribution curves is obtained; while in the second case hyperbolic curves are obtained. In conclusion, it has been possible to model the deoxygenation process as a consequence of the carbonaceous and nitrogenous organic load, inorganic matter and oxygen deficit. It is recommended to use the program for an experimental work, since it is developed to predict results from preliminary experimental data such as flow regime and flow rate.

**Keyword:** mathematical modeling, scattering, Streeter Phelps.



## **I. INTRODUCCIÓN**



Los cuerpos de agua están permanentemente sometidos a diversos tipos de contaminantes, los de carácter inorgánico (sales, ácidos, metales, álcalis, relaves mineros, entre otros) y los orgánicos (residuos domésticos, industriales, agroquímicos, etcétera) (Loucks y Van Beek, 2017). Respecto a los contaminantes domésticos, es preocupante las zonas que no cuentan con servicio de alcantarillado, estos residuos son descargados directamente a los cuerpos de agua más cercanos, comúnmente al lecho de los ríos. Estos residuos contienen materia orgánica biodegradable y por ende provocan la disminución del oxígeno disuelto en el agua, afectando negativamente el ecosistema acuático.

El recurso hidrológico en el Perú necesita de una proyección integral para su utilización, consta de una descarga de aguas residuales anual de 960.5 millones de metros cúbicos, pertenecientes a desagües domésticos 64%, desagües pesqueros al 4.4%, desagües de industrias 5.6%, efluentes de minería 25.4% y 0.2% a efluentes petroleros. Llegando a los cuerpos de agua superficial, ya sean mares, o aguas subterráneas (MINAGRI, 2018).

Cuando los contaminantes son ingresados accidentalmente tienen un carácter de temporalidad; sin embargo, en el caso de los procesos naturales y vertimientos los periodos de duración suelen ser largos, ocasionando el deterioro progresivo de los ecosistemas acuáticos.

Un caso particular de contaminación es aquel que se genera por ingreso de materiales inorgánicos como ácidos, álcalis o sales, que en el cuerpo de agua receptor son totalmente solubles y se dispersan por dos mecanismos: la advección que se da debido al movimiento del flujo de agua, y el difusivo que se da por diferencia de concentraciones en la zona de mezclado.

A partir de este se plantea el Problema General: ¿Cómo se podrá modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río? y sus problemas específicos ¿Cuáles son las características hidrodinámicas y parámetros de flujo considerados para el modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río? ¿Cuál debe ser el modelo



matemático a aplicar al flujo de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos? ¿Cuáles son los métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto? ¿Cuál será el software que permite resolver el modelo resultante de proceso de dispersión?

La justificación (Fernández ,2020). Un estudio cuenta con justificación practica cuando su desarrollo ayuda a resolver un problema o al menos propone estrategias que al ponerse en práctica contribuirán a su solución, como justificación práctica y teórica de la presente investigación, se desarrolló un modelo y un programa que se puede utilizar para simular la dispersión de contaminantes tanto orgánicos, como inorgánicos en un cuerpo de agua superficial, de esta forma aportamos una valiosa herramienta para el control de la calidad de aguas en entornos propensos a diversos vertimientos de contaminantes dado que los monitoreos en campo y análisis son costosos. En este caso, gracias a esta herramienta sólo se requiere las concentraciones iniciales en el punto de vertido para conocer la distribución espacial y temporal de dichos contaminantes.

Desde el punto de vista de la gestión ambiental, esta investigación propone la aplicación del modelamiento como una herramienta de prevención y control en nuestros recursos hídricos.

Como objetivo general se plantea: Modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río.

El primer objetivo específico, determinar las características hidrodinámicas y los parámetros de flujo del rio que permita modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos, el segundo objetivo, proponer el modelo matemático aplicable al proceso de dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río, el tercer objetivo, determinar los métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto y como cuarto objetivo es utilizar un software apropiado para desarrollar un programa que resuelva el modelo de dispersión propuesto.



Como hipótesis general tenemos: El uso de los principios de conservación de materia, junto con las herramientas matemáticas y la ayuda de un software permitirá modelar y simular la dispersión de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río.

La primera hipótesis específica es el conocimiento de las características hidrodinámicas y los parámetros de flujo que permiten la simulación la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos, la segunda hipótesis es el modelo matemático propuesto que es aplicable al proceso de dispersión de la mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos, el tercero es los métodos de solución aplicables al modelo de Streeter y Phelps modificado, son los métodos de Lines y de diferencias finitas, y el cuarto es el programa desarrollado permite simular adecuadamente diversas condiciones similares a las propuestas en la investigación.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **Antecedentes internacionales**

Hidayah, Sani y Cahyonugroho (2020), en su investigación titulada: “Evaluación de la calidad del agua del río Surabaya, tramo Karang Pilang-Gunung Sari, mediante el modelo Streeter-Phelps”, tuvo como objetivo identificar la calidad del agua del río Surabaya y evaluar los parámetros orgánicos de la calidad del agua del río con el modelo Streeter-Phelps. Analizaron el oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) además de los parámetros de pH y temperatura. La muestra la tomaron en el río Surabaya entre el segmento Karang Pilang-Gunung Sari en épocas de avenidas. Utilizaron el modelo Streeter-Phelps para aplicar el modelado de datos. entonces con la comparación entre la medición y el modelado de parámetros orgánicos se concluye que el modelo Streeter-Phelps es apto para monitorear la calidad del agua del río Surabaya.

Ramos (2020), en su investigación: “Simulación de la dispersión de Cr (III) en la Cuenca Alta del Río Bogotá utilizando el modelo WASP, Su objetivo fue realizar la simulación de la dispersión del Cr (III) en un tramo a lo largo de Villapinzón con el modelo WASP, para mostrar la dispersión del contaminante se identificaron 8 zonas de mezcla en dicho tramo, esto para poder tomar medidas de tratamiento. como principal factor se tomaron el flujo, la geometría y coeficiente de dispersión del sistema, se obtuvo un mínimo error con el modelo WASP. Entonces, se demostró que con este modelo se puede obtener resultados más precisos mediante uso de datos hidráulicos con métodos experimentales más precisos.

Chinh, Hiramatsu, Harada y Cuu (2017), en su investigación: “Estimación de la capacidad ambiental del agua en la cuenca del río Cau, Vietnam, utilizando el modelo Streeter-Phelps”, se ha establecido el modelo de evaluación de niveles de oxígeno disuelto (OD) y DBO del río Ohio, EE. UU. Este modelo simple, estima la capacidad de autolimpieza del río a partir de los efectos de la biodegradación, sedimentación y adsorción. En el flujo del proceso, el efecto de autolimpieza reducirá la concentración de contaminantes orgánicos en el agua. El modelo utilizado en este estudio utilizó el sistema esquemático y las ecuaciones básicas que son para determinar la calidad del agua, incluyendo la carga contaminante de las subcuencas y la carga contaminante



descargada directamente al río Cau. Se presentó un modelo útil para estimar la capacidad del medio hídrico en la cuenca, en este caso faltó datos e información de entrada, por lo que se tomaron datos de entrada aérea a lo largo del río Cau que tenía datos de años anteriores, como el fósforo total, nitrógeno total, sólidos suspendidos totales, demanda de oxígeno de carbono y demanda bioquímica de oxígeno. Finalmente se evaluó la capacidad ambiental hídrica del río, la cual se ha comparado los resultados con los estándares, donde muestra que excedieron los valores la cual indica que la cuenca está muy contaminada y tiene poca capacidad de autolimpieza, esto indica que el modelo Streeter-Phelps es aplicable para evaluar los niveles de contaminación de la cuenca del río Cau.

Bergamaschi y Mélo (2016), en su investigación “Modelo de simulación OD y DBO que integra río y embalse aplicado al río Tiete” (*del portugués: “Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê”*), El objetivo fue desarrollar un modelo de simulación de DO Y DBO, combinando ríos y embalses, con la aplicación de Microsoft Office Excel para aplicar al río Tiete, se desarrolló en una hoja de cálculo en el Excel en la cual se utiliza las ecuaciones de Streeter Phelps modificado, consistió en la estimación de las concentraciones de OD y DBO a lo largo del río, subdivididas en tramos, y en el embalse, a partir de una concentración inicial y características del sistema como las velocidades del flujo del río, coeficientes de degradación de contaminantes y volúmenes de embalse. En conclusión, se representó infalible a la realidad. La calibración fue satisfactoria por el número de puntos monitoreados en el tramo. Entonces el modelo tiene la posibilidad de adaptarse fácilmente a otras cuencas hidrográficas con características similares, que se llegó a analizar.

### **Antecedentes nacionales**

Quiñones et al. (2020), Como objetivo de la investigación fue emplear el modelo Streeter-Phelps para estimar el oxígeno disuelto del Río Utcubamba, el método se realizó mediante un orden. Utilizaron datos reportados y documentados, eligieron puntos de muestreo, tomadas del cauce del río en épocas lluviosas, calcularon la distancia entre los muestreos, seleccionaron punto de muestreo donde se podría





aplicar la modelación matemática, se seleccionó las variables para estimar el OD con el modelo Streeter y Phelps, luego se utilizó el software Matlab 2017a, para la simulación de los datos de OD, y por último se utilizó la prueba de normalidad de shapiro-wilk con un programa statistix, para los residuos entre los datos reales y el calculado. En conclusión, las predicciones del comportamiento de OD de la investigación son fiables. Por otra parte, el manejo de la modelación matemática ofrece futuros modelos para predecir parámetros de OD para todo río.

Pérez (2017), en su investigación: “Estudio del transporte hidrodinámico del nitrato como contaminante de los ríos”, para medir la concentración del nitrato en los ríos, resolvió el caso no estacionario unidimensional, con una ecuación de dispersión-advección y reacción del vertido. Para la obtención de este plan, se ofrecieron las teorías sobre los cuales se basa el estudio. Se encuentra la solución en cuadraturas para problemas de tipo parabólico que modelan la concentración del nitrato como contaminante del río, valorando una sola fuente de contaminantes en el semieje derecho. Por tener solución única el problema y así mismo mayor aplicación práctica, solo se ofrece la solución analítica para los casos de índice cero del coeficiente del problema de Riemann. Concluye que el transporte hidrodinámico del nitrato como contaminante en los ríos es un problema cada vez más frecuente y preocupante. Mediante las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, específicamente las ecuaciones de tipo parabólico, lograron modelar de forma idónea la concentración de los contaminantes en los ríos.

Claros et al. (2017), en su investigación, establece un modelo matemático que realizó mediante la ecuación de advección - difusión unidimensional con coeficiente constante, donde evaluó al aforo del caudal, esto mediante la inyección de un trazador. Se identificó un trayecto del río con flujo uniforme con poca turbulencia y en época de estiaje a avenida, también detallan la importancia de tener varios datos experimentales para alcanzar la precisión en la simulación de la ecuación advección, evaluando la composición química del colorante artificial sea rojo o azul la cual se ha identificado la interacción con el fluido. En conclusión, la variación de la dispersión del contaminante es causada por el caudal y tipo de fluido, por ello es necesario tomar las muestras en



diferentes tramos para poder simular y ver el comportamiento de la ecuación de advección y difusión.

Quispe et al. (2016), en su investigación señala su objetivo que es estudiar el modo de dispersión de un contaminante, para lo cual utilizó el método de sustancia traza, la cual se aplicó en un tramo de 100 metros del río Chumbao, en Andahuaylas, Perú. El marcador utilizó una solución de cloruro de sodio, vertido mediante un tubo de vidrio, recolectaron la muestra cada 30 segundos y con ello estimaron la concentración en el punto de vertido, con esto los posibles valores de parámetros de dispersión del contaminante del río, la cual se demuestra que es un modelo de dispersión gaussiana, que representa precisión, así también se describió la utilidad de la sal común como trazador químico de alta eficiencia, la cual se detectó casi instantáneamente en este tramo seleccionado la dispersión de los contaminantes en el río.

## **Bases teóricas**

### **Contaminación en ríos sudamericanos**

La problemática entre países desarrollados y las que están en vías de desarrollo, es muy notoria, los orígenes de la contaminación en América Latina vienen a ser la parte social, económico, cultural y legislativo. En cambio, los países desarrollados, se orientan en ejecutar planes de vigilancia, protección y recuperación de los Recursos Hídricos, a diferencia de esto, los países en vías de desarrollo, se encuentran con dificultad o trabas legales para realizar el control de vertidos en el recurso hídrico.

El 70% de la población de América Latina carecen de sistemas hidrosanitarios, que no permitan el tratamiento de aguas residuales y así retornan a los cuerpos de agua sin haber sido tratadas, el 80% vive en ciudades y en asentamientos colindantes a las fuentes contaminadas, generándose un problema de salud pública y medio ambiente (The Word Bank, 2016).

Las sustancias orgánicas e inorgánicas, contaminan el agua. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), el contaminar el agua, es un peligro para la Salud Pública, la preocupación de contaminar el agua, es la presencia de altos niveles

de arsénico inorgánico, plomo y cadmio por las consecuencias, tales como cáncer, enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus, etcétera. En los distritos de Lima, la Oroya y Juliaca, el nivel de concentración del arsénico inorgánico fue de 13 a 193 microgramos por litro para las aguas superficiales y subterráneas, que según lo recomendado por la OMS es el más alto que el límite de 10 microgramos por litro (Larios, Gonzales y Morales, 2016).

Otro problema es la contaminación generada por la preparación de pasta básica de cocaína en la selva de Colombia lo cual tomaron una muestra de agua del río en el municipio de San Calixto, y evaluaron los impactos ambientales en el recurso hídrico, debido a la producción de la PBC. Determinaron que entre las consecuencias que se generan está la alteración de los ciclos hidrológicos, deforestación y el uso excesivo de componentes químicos (Rodríguez, 2019).

Para la producción de pasta básica de cocaína (PBC) se emplean productos como gasolina, ácido sulfúrico o clorhídrico, carbonato de sodio, sal, entre otras sustancias tóxicas que constituyen los residuos químicos de pasta básica de cocaína, estos son contaminantes orgánicos e inorgánicos, y son desechados irresponsablemente a los suelos y aguas (Bernex, 2008, citado por Vila, 2017). Estos contaminantes son mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos, los cuales no reciben tratamiento pues son elaboraciones ilegales, además de realizarlo en lugares profundos de la Amazonía.

### **Características de los modelos de simulación**

Según Carrasco (2018), el modelamiento es la representación matemática de los fenómenos fisicoquímicos y biológicos que ocurren en la naturaleza.

Específicamente en lo referente al presente trabajo está referido a los procesos de dispersión de contaminantes en cuerpos de agua de flujo superficial como son los ríos. Estos modelos son resueltos utilizando métodos diversos con datos de parámetros supuestos que permiten calibrar el modelo; es decir que permita obtener datos esperados.



Hablamos de simulación cuando el modelo ha sido calibrado adecuadamente, los parámetros supuestos son reemplazados por parámetros reales muchas veces proveniente de deducciones teóricas o de datos experimentales (Carrasco, 2020).

En nuestro caso, se utilizó parámetros en forma de ecuaciones que a su vez, fueron obtenidos experimentalmente en otras investigaciones. Por tanto, la simulación nos permite evaluar una serie de posibles escenarios de contaminación de los cuerpos de agua superficial, referidos por ejemplo al nivel de contaminación inicial, a los parámetros geométricos del río, a su hidrodinámica, al contenido de sales, a las variaciones respecto a la temperatura y presión, entre otros.

Según López (2016), se puede utilizar el modelo, antes de ir al medio receptor, en caso de que ya ocurre una emisión o descarga en el medio receptor, se puede conocer para poder controlarla, pero poco se puede hacer cuando la dispersión ya está en ese medio, el modelo se puede aplicar en medios fluidos como el aire, y el agua, que se dispersan en el medio.

Los modelos de dispersión se pueden utilizar para analizar el problema, estos son representaciones de la realidad que sirven a los gestores, para tomar decisiones en el tiempo y espacio, sobre como evolucionar en el medio receptor.

Tipos:

Modelos físicos: representación a escala, es decir con un tratamiento experimental de los problemas que se quieren conocer, como hacer una maqueta, y ver los medios de transporte y dispersión de los contaminantes, estos problemas deben ser tratados de manera instrumentalizada, y representa la realidad a través de otra realidad.

Modelos matemáticos: representación numérica a través de las ecuaciones que a su vez consideran los problemas que queremos resolver, es este sentido, los modelos matemáticos, tienen una conceptualización más, al pasarlo a las ecuaciones, y se tienen que utilizar técnicas numéricas de resolución.

Los modelos matemáticos, representan la realidad de manera permanente, como haciendo una foto a una situación concreta, o de manera transitoria analizando lo que



pasa en el tiempo. En cambio, los modelos físicos representan una situación puntual o una evolución temporal en su caso.

Hay ocasiones en la que los modelos matemáticos, tienen solución analítica y otras en que no, entonces debemos acudir una solución numérica, en volúmenes finitos en diferencias finitas, elementos de contorno, elementos finitos, que permitan una resolución de estas ecuaciones, de manera puntual, vamos a utilizar puntos dentro de las mallas que se representará para solucionar esas ecuaciones, en ocasiones, para analizar un problema con detalle, deberá refinar la malla, ligada al modelo numérico que se va a utilizar.

Beneficios de modelar en lugar de monitorear los datos

- El modelado podría ser factible en algunas situaciones donde el monitoreo no lo es.
- Los Modelos también se pueden utilizar para determinar distribuciones preliminares de probabilidad de deterioro que puede ayudar a administrar los esfuerzos de monitoreo y reducir la cantidad de datos de seguimiento necesarios para tomar decisiones de cotización en un nivel dado de fiabilidad.
- El modelado se puede utilizar para predecir situaciones futuras de calidad del agua resultantes de diferentes estrategias de manejo. Por ejemplo, evaluar la mejora de la calidad del agua después de una nueva planta de tratamiento de aguas residuales que comienza a operar, o el efecto del aumento del crecimiento industrial y vertidos efluentes (Loucks y Van Beek, 2017).

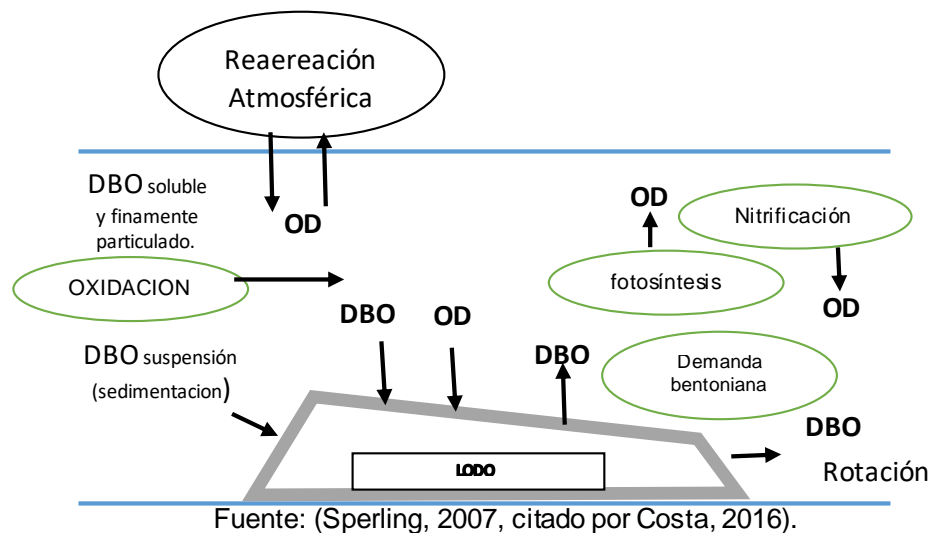
**El modelo de Streeter – Phelps.** Este modelo fue desarrollado para el Río Ohio en Estados Unidos, en el año 1995, este modelo muestra el comportamiento del Oxígeno disuelto y la demanda Bioquímica de oxígeno a lo largo de un río, la cual permite evaluar los impactos ambientales causados por contaminantes según (Costa, 2017).

La introducción de materia orgánica en un cuerpo de agua da como resultado el consumo de oxígeno disuelto en la respiración de las bacterias descomponedores al realizar los procesos de estabilización de la materia orgánica. La autodepuración es un proceso natural, en el que cargas contaminantes, desde orgánicos, liberados en un

cuerpo de agua se neutralizan. Este proceso se debe a la asociación de varios procesos físicos (dilución, sedimentación y atmosférica), química y biológica (oxidación y descomposición) (Andrade, 2010, citado por Costa, 2016).

En el proceso de autodepuración, existe un equilibrio entre las fuentes de consumo y producción de oxígeno, como se ilustra en la figura 1 (Sperling, 2007, citado por Costa, 2016).

Figura 1: Mecanismos de interacción en el balance de OD



Los principales fenómenos que interactúan en el consumo de oxígeno:

- Oxidación de materia orgánica.
- Nitrificación.
- Demanda bentónica.

En producción de oxígeno:

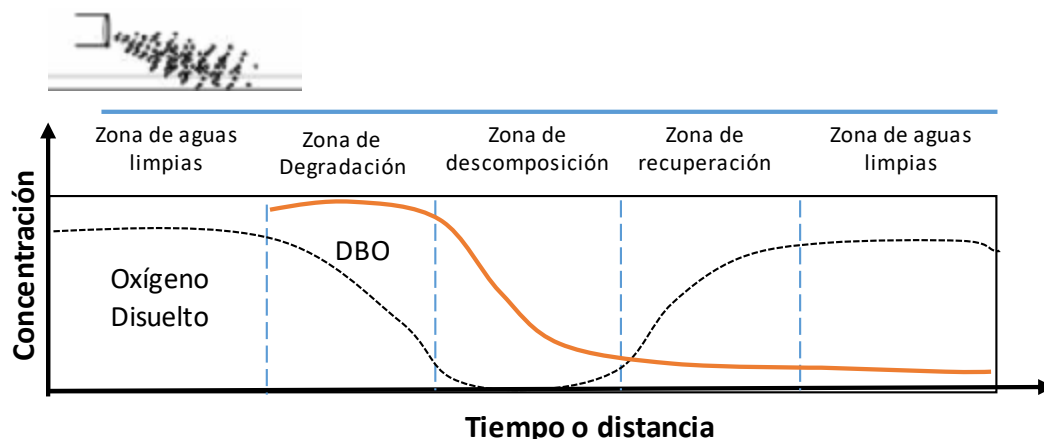
- Reaeración atmosférica.
- Fotosíntesis.

El proceso de autodepuración está vinculado a reestablecer el equilibrio en el medio acuático, siguiendo los cambios inducidos por el vertimiento del afluente. Debe quedar claro que no hay una purificación absoluta, el ecosistema vuelve a alcanzar el equilibrio, pero en condiciones diferentes a las anteriores, aumento de productos y subproductos de la descomposición.

El proceso de auto-purificación ocurre con el tiempo, considerando la dimensión del río, que actúa como receptor de alcantarillado. Las principales áreas de autopurificación se mencionan a continuación y se describen en la figura 2

- Zona de degradación.
- zona de descomposición activa.
- zona de recuperación y zona de agua limpia.

Figura 2: Perfil esquemático de zonas autolimpiables



Fuente: Andrade 2010, citado por Costa, 2016

El modelo de Streeter Phelps conocido como el modelo de curva de hundimiento de oxígeno, también se utiliza para predecir los cambios en la calidad del agua superficial. Aguas grises vertidos en el sistema de drenaje con concentraciones de Oxígeno disuelto (Athirah, 2020).

Las siguientes ecuaciones describen el modelo de Streeter Phelps:

Streeter Phelps Básico:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -k_d L$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = k_d L - k_d D$$

Streeter Phelps Modificado:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -V \frac{\partial L}{\partial X} + D_x \frac{\partial^2 L}{\partial X^2} + k_d L$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -V \frac{\partial D}{\partial X} + D_x \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} + k_d L - k_d D$$

Donde:

$L$ : Demanda bioquímica de oxígeno

$D$ : Déficit de oxígeno.

$V$ : Velocidad de flujo

$k_d$ : Coeficiente de desoxigenación

$k_a$ : Coeficiente de aireación

$x$ : distancia

$t$ : tiempo

## **Contaminantes orgánicos e inorgánicos**

### **Carga orgánica**

Los niveles de enriquecimiento orgánico / agotamiento de oxígeno (oxígeno bajo) en el agua pueden ocurrir naturalmente durante períodos cortos, pero cuando son extremos o duraderos, pueden enfermar e incluso matar peces y otros animales acuáticos. Las aguas residuales, los tanques sépticos con fugas, la escorrentía de granjas y corrales de engorde y la escorrentía de las calles de la ciudad contienen materiales orgánicos que se descomponen y consumen oxígeno en el agua; la temperatura del agua más alta también reduce los niveles de oxígeno. Estos efectos fueron causados por la introducción de un contaminante orgánico de diferentes fuentes (Muñoz y Aldás, 2017).

### **Carga inorgánica**

Se refiere a una amplia gama de contaminantes que incluyen metales, retardadores de fuego, cianuro y perclorato (utilizado en el combustible de cohetes) que son venenosos para la vida acuática y las personas. Las descargas industriales o de aguas residuales, la minería, los vertederos y la deposición atmosférica de los gases de escape de los automóviles y las emisiones de las centrales eléctricas de carbón



pueden contribuir a altos niveles de sustancias químicas inorgánicas tóxicas en las vías fluviales (Briso, 2017).

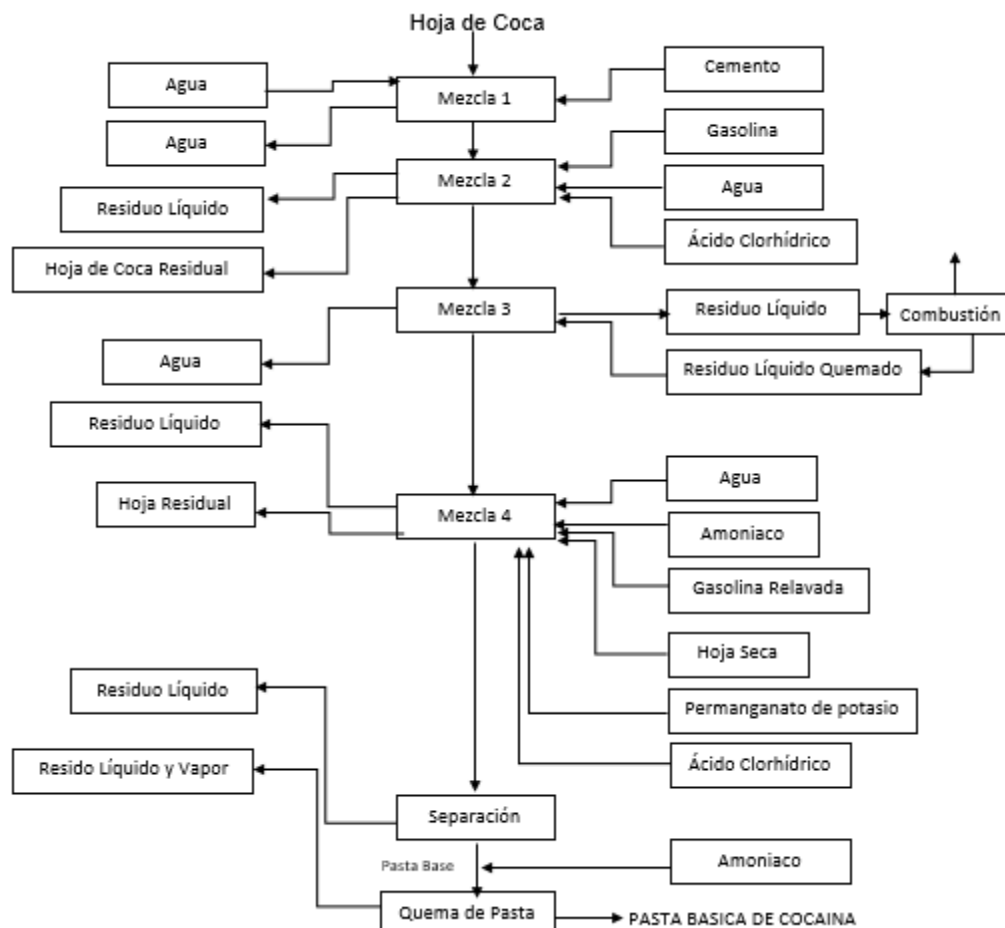
La presencia de diferentes contaminantes tóxicos en el río afecta negativamente a los animales y plantas acuáticos en el medio ambiente circundante. Por lo general, afectan la biota acuática de los macroinvertebrados al alterar el equilibrio y el funcionamiento normal del ecosistema (Maschal y Amsalu, 2018).

### **Mezclas de contaminantes orgánicos e inorgánicos**

Muchos procesos químicos generan mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos, uno de ellos lo constituye la elaboración de Pasta Básica de Cocaína (PBC), en la Figura 3, se muestra el diagrama de flujo del proceso y se observa el uso de compuestos orgánicos como la propia coca que es un alcaloide (*Erythoxylum coca*) y la gasolina, que es un hidrocarburo. Entre los compuestos inorgánicos, se utiliza el ácido clorhídrico (HCl), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y permanganato de potasio (KMnO<sub>4</sub>). Tal como se puede observar se generan mezclas de residuos sólidos y líquidos en diversas etapas del proceso. Estas mezclas de residuos de compuestos altamente tóxicos son los que impactan en los ecosistemas, perjudicando el hábitat de las especies de fauna y flora; la contaminación de los cuerpos de agua, suelo, aire, afectan al ser humano y su interacción con su hábitat.

Asimismo, se establece el balance de materia que muestra la obtención de 330 gramos de pasta básica de cocaína, se requiere una gran cantidad de insumos cuya ratio de producción de insumos a productos es bastante elevado, lo cual produce una gran cantidad de residuos peligrosos que ocasionan grandes problemas a todos los ecosistemas en general (Rodríguez, 2019)

Figura 3: Diagrama de flujo para la obtención de Pasta Básica de Cocaína



Fuente: Rodríguez, 2019

### Software Polymath

Polymath es un sistema computacional que se estableció para uso pedagógico y profesional. Los resultados se presentan de forma gráfica para facilitar la comprensión, y para su incorporación en los documentos e informes. Lo utilizan Ingenieros, matemáticos, científicos, estudiantes o cualquier persona con necesidad de solucionar problemas, estimarán la eficiencia y velocidad de resolución de problemas.

El software utiliza un editor de pantalla llena con un código de colores. Todas las pantallas se han optimizado para la eficiencia del usuario. También tiene versiones, con capacidad única para exportar automáticamente cualquier problema en Excel. Por lo tanto, los problemas se pueden resolver por completo en Polymath o exportando a Excel para solución.



## Conceptos básicos

A continuación, se describen los términos básicos que se utilizarán en la presente investigación:

**Advección:** Es el transporte de una sustancia contaminante por el agua, es decir, es el transporte debido al flujo. Si solo hubiera este mecanismo, el contaminante recorrería a la misma velocidad que el agua y la extensión ocupada por el contaminante sería constante (Carrasco, 2018, p.725).

**Advección-difusión:** Es cuando operan ambos mecanismos de transferencia es decir mientras el contaminante viaja por el río, este se va disipando (Carrasco, 2018, p.725).

**Déficit de oxígeno:** Diferencia que existe entre la concentración de saturación de oxígeno y la concentración en cualquier instante, expresada en (mg/L) (Feria et al. 2017).

**Déficit crítico:** Es la cantidad máxima de oxígeno consumido por la presencia de la DBO; luego de este déficit comienza la recuperación de oxígeno disuelto por el proceso de reoxigenación.

**Demanda bioquímica de oxígeno(DBO):** Es la cantidad de oxígeno que se consume para degradar la materia orgánica y se expresa en mg de oxígeno por litro de agua (Menéndez y Dueñas, 2018).

### **Demanda bioquímica de oxígeno carbonácea (DBOC)**

Es la cantidad de oxígeno que se consume para degradar el carbono orgánico que se encuentra en los vertidos y se expresa en mg de oxígeno por litro de agua

### **Demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada (DBON)**

Es la cantidad de oxígeno que se consume para degradar el nitrógeno orgánico que se encuentra en los vertidos y se expresa en mg de oxígeno por litro de agua.

**Desoxigenación:** Es el proceso en el cual se consume oxígeno para degradar la materia orgánica presente en el cuerpo de agua (Pradana, 2019).



**Dispersión:** Se refiere al esparcimiento físico de materia en un medio. Es la acción de dividir o repartir (Herrera, 2017).

**Difusión:** Es el mecanismo por el cual el contaminante depositado en un punto de un fluido en reposo se ha ampliado debido a la diferencia de concentración entre el soluto(contaminante) y el medio(agua) (Carrasco, 2018, p.725).

**Hidrodinámica:** Parte de la hidráulica, trabaja el movimiento de fluido, está definido por un campo vectorial de velocidades correspondientes a las partículas del fluido y de un campo escalar de presiones, que corresponden a diferentes puntos del mismo y que es manejado por el Principio de Bernoulli (Riaño, 2020).

**Longitud crítica:** Longitud en la cual, el déficit de oxígeno toma un valor máximo, como consecuencia del consumo de oxígeno por la presencia de la DBO en un sistema abierto.

**Oxígeno disuelto (OD):** Cantidad de oxígeno que se encuentra en la fase líquida como consecuencia de la disolución del oxígeno atmosférico, expresado en (mg/L) y que depende de la presión y temperatura. Un déficit alto de oxígeno disuelto se refiere a que el agua tiene un alto contenido de carga orgánica, ya sea por aguas residuales. (Higashino y Stefan, 2017).

**Oxígeno disuelto saturado:** Cantidad máxima de oxígeno que puede ser solubilizada en un cuerpo de agua, expresada en (mg/L) que depende de la presión y temperatura (Lei et al. 2016).

**Reoxigenación:** Es el proceso en el cual la tasa de disolución de oxígeno en el agua se incrementa como consecuencia de la pérdida de materia orgánica por oxidación de la misma (Treeranut, 2016).

**Tiempo crítico:** Tiempo en el cual el déficit de oxígeno toma un valor máximo como consecuencia del consumo de oxígeno por la presencia de la DBO en un sistema cerrado.

### **III. METODOLOGÍA**

### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

#### **Tipo de investigación.**

Por el propósito o finalidad, es una investigación aplicada con enfoque mixto se trabaja con datos experimentales de fuentes secundarias que implica una recaudación, análisis e interpretación de datos cualitativos y cuantitativos que se ha considerado necesarios para el estudio como los valores de los parámetros cinéticos reportados en la literatura. Según la naturaleza de la información que se recoge para responder al problema de investigación (Otero, 2018).

#### **Nivel de investigación.**

Su nivel es correlacional, pues relaciona las variables, dependiente e independientes, es decir en la relación causa-efecto (Tacillo, 2016). Este tipo de investigación está indicado para determinar el grado de relación y semejanza que pueda existir, entre dos o más variables, es decir entre características o conceptos de un fenómeno.

#### **Diseño de investigación.**

Cuasi experimental, explicativa y predictiva; Dado que el presente trabajo de investigación son derivados de estudios experimentales, lo cual se ha tomado datos experimentales de otros artículos de diferentes autores, pero difiere de los experimentos puros, en el grado de confiabilidad, ya que es un modelamiento y simulación, por tanto, no se aplica el diseño experimental, es decir los valores de los parámetros y otros datos requeridos se toman directamente de la literatura que con anterioridad han sido experimentadas y validadas (Tacillo, 2016).

#### **Método de la investigación.**

La investigación aplicó los lineamientos de la metodología de la investigación científica y en tal sentido, sus resultados son rigurosidad y



replicables en condiciones similares a las establecidas en la ejecución del trabajo.

### 3.2. Variables y Operacionalización

**Variable dependiente.** - Se describe como de principal interés, de desenlace, resultado o predicha, la variable dependiente cambia en respuesta a la independiente, es decir es el resultado o efecto de las variables independientes (Villasís y Miranda, 2016).

- Modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos

**Dimensión.** - Se denominan como sub variables. En general especifican la conducta de la variable en estudio, tomando como referencia (Robbins y Coulter, 2017).

- Longitud y tiempo a la cual se alcanza una concentración similar a los niveles antes del vertimiento de la mezcla de contaminantes.

**Indicador.** - Es la cuantificación o la traducción numérica de las dimensiones, se representan de forma clara, para entender cómo se comportan las dimensiones y por ende la variable de interés (Carballo, 2016).

- Concentración espacial y temporal (ppm) de los contaminantes

**Variables independientes.** - La variable independiente es como la variable predictora o que el investigador manipula, es la variable de causalidad para así lograr llegar a la variable dependiente (Villasís y Miranda, 2016).

#### a) Características hidrodinámicas y parámetros de flujo del río

##### Dimensiones

Tipo de flujo

Relación entre la fuerza viscosa y la fuerza de la gravedad



**Indicador**

Numero de Reynolds máximo

**b) Modelo matemático aplicable al flujo de la dispersión de la mezcla de contaminantes.**

**Dimensiones**

Análisis de los modelos

**Indicadores**

Estabilidad del modelo

**c) Métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto.**

**Dimensiones**

Estabilidad de los valores reportados

**Indicadores**

Topología de las curvas de dispersión

**d) Programa que resuelva el modelo para condiciones propuestas**

**Dimensiones**

Facilidad de uso del programa

**Indicadores**

Tiempo empleado para la programación

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES (ver anexo 01)



### 3.3. Población (criterios de selección), muestra, muestreo, unidad de análisis

**Población:** El universo está constituido por los cuerpos de agua fluyentes ríos superficiales, donde las características hidrodinámicas deben ser conocidas para la aplicación del modelamiento y simulación. Respecto a los contaminantes, está constituido por una amplia gama de concentraciones de dispersión de una mezcla de materia orgánica e inorgánica, con afinidad a los modelos, la cual son aquellos derivados del modelo básico de Streeter-Phelps (Cabezas, Andrade y Torres , 2018).

**Muestra:** Condiciones hidrodinámicas de los ríos, se seleccionará un flujo turbulento, con ingreso tipo pulso y permanente de la mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos, con posibles escenarios de vertimiento de contaminantes. Esta muestra es la parte pequeña de la población, la cual permitirá dar a conocer datos específicos de la misma (Cabezas, Andrade y Torres , 2018).

**Muestreo:** Dado que la presente investigación es de modelamiento y simulación no aplica muestreo, los datos que se requieran serán tomados de fuentes secundarias disponibles en la literatura especializada.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En la presente investigación las técnicas de recolección de datos que utilizamos es un análisis documental en el cual se elige los parámetros que se va a utilizar para la simulación (Bernardo, Carbajal y Contreras, 2019. P.97), Se debe elegir y saber utilizar la información obtenida, como también examinar y saber la autenticidad, para la revisión y ejecución de algunos datos científicos utilizados de artículos e investigaciones, todos los datos utilizados tienen correlación desde las variables, hipótesis con los resultados (Albers, 2017).

Los modelos de los parámetros son obtenidos de información secundaria, los datos de entrada son datos científicos supuestos, típicos para episodios



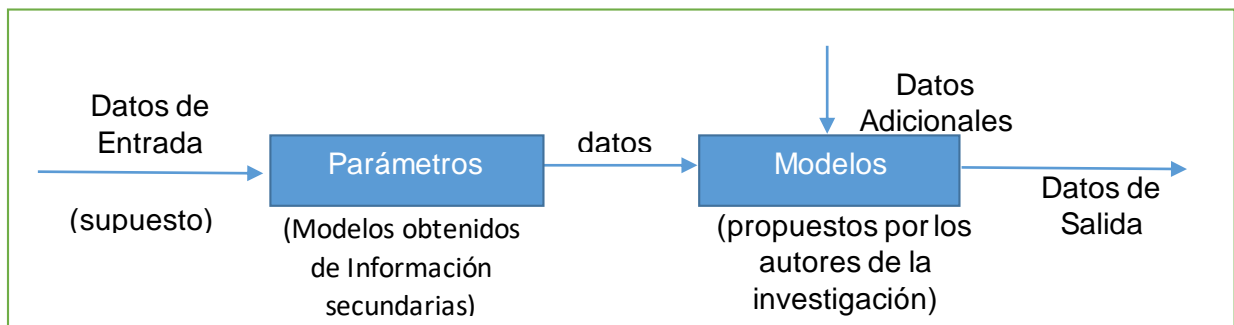
de contaminación, y los datos de salida son obtenidos a partir de la ejecución del programa (Brenner et al. 2005, citado por Gomez y Motta, 2016).

Para el modelamiento del proceso dispersión de mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos de un río, se requieren básicamente los siguientes datos:

- Concentraciones de materia orgánica: porcentaje de materia orgánica carbonosa, materia orgánica nitrogenada y materia inorgánica en el efluente.
- Características hidrodinámicas del cuerpo receptor.
- Modelo matemático que describen el proceso de dispersión de mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos.
- Parámetros del modelo indicado
- Software Polymath que resuelve el modelo y reporta las curvas de concentración del contaminante.

### 3.5. Procedimientos

Figura 4: Proceso de ingreso y salida de datos



Fuente: Elaboración propia

Los procedimientos necesarios para desarrollar la presente investigación son los siguientes:

- a) Recolección y análisis del estado de la técnica en lo referente al modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río.
- b) Desarrollar el modelamiento matemático del transporte de masa de



contaminantes orgánicos e inorgánicos, para lo cual se trabajó con la ecuación general de conservación de masa, incluyéndose los términos que describen la variación temporal, el transporte advectivo, el transporte por difusión turbulenta y la tasa de consumo por reacción.

- c) Establecer los criterios para el modelamiento: condiciones para flujo turbulento, es decir con un alto número de Reynolds y un perfil de velocidad para flujo turbulento; conocimiento de la tasa de reacción, la cual depende principalmente del contaminante presente en el cuerpo receptor y las posibles interacciones que puedan darse. Por lo general se considera una cinética de pseudo primer orden para el componente inorgánico, puesto que el contaminante está en una proporción muy baja respecto al agua. Para los componentes orgánicos se requiere el uso de las correlaciones que dependen de las condiciones hidrodinámicas del cuerpo de agua.
- d) Determinar la velocidad media del cuerpo receptor. Experimentalmente este valor se obtiene a partir de mediciones del tiempo de desplazamiento de un objeto flotante a lo largo de una distancia fija; en este caso, se propone valores para ingresar al modelo respectivo.
- e) Cálculo del coeficiente de difusión. Este dato se obtiene a partir de la edición de datos experimentales de concentración de un trazador y tiempo en dos puntos específicos del segmento del río estudiado. En la presente tesis se aplican las ecuaciones de cálculo y las correlaciones para su cálculo.
- f) Para el modelamiento se requiere conocer la solubilidad del oxígeno en función a la temperatura, contenido de sal y presión atmosférica, lo cual se determinó mediante correlaciones.
- g) El programa también considera el ingreso de cargas difusas puntuales y aportes por fotosíntesis; así como, consumo de oxígeno por respiración.
- h) Condiciones del ingreso de contaminante: se requiere conocer si el ingreso del contaminante es instantáneo (que puede darse por una situación accidental o de forma deliberada); sin embargo, se requiere que



esta condición sea de tipo pulso. El otro modo de ingreso de contaminante puede ser de forma permanente o intermitente. Estas dos condiciones son requeridas para la ejecución del programa.

- i) Se elaboró un programa de calculo que permite simular las diversas condiciones indicadas en los ítems anteriores. La longitud del rio se subdivide en 10 partes, se obtiene un total de 40 ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales son resueltos mediante el software Polymath, versión 6.2. Los gráficos complementarios se elaboran en Excel.
- j) Se ha realizado un análisis y discusión de los resultados obtenidos en la simulación, los cuales deben ser coherentes a los reportados en la literatura y mostrar un comportamiento típico gaussiano con el ingreso instantáneo e hiperbólico si el ingreso es permanente.

## **Modelamiento de la calidad del agua**

### **Condiciones**

- a) Uno de los contaminantes más conocidos en la selva peruana es aquella que es vertida por la industria del narcotráfico. Sus efluentes contienen carga orgánica carbonosa y nitrogenada además material inorgánico como son las sales utilizadas durante el proceso
- b) En consecuencia, el modelamiento considera la dispersión de estos contaminantes por los procesos de advección, difusión y reacción
- c) Se considera la dispersión de los contaminantes en régimen turbulento, es decir que el flujo de agua no presenta perfiles de velocidad.
- d) Se considera las correlaciones para el cálculo de la solubilidad del oxígeno, considerando su variación con la temperatura, presión y contenido de sal del cuerpo de agua receptor.
- e) El modelamiento considera la ecuación básica de Streeter-Phelps modificada.
- f) Se analizará los casos de ingreso instantáneo e ingreso permanente de contaminantes al cuerpo receptor.



Las ecuaciones correspondientes son:

**Carga orgánica carbonácea:**

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -U \times \frac{\partial L}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - k_{rL} \times L + wc \quad (1)$$

**Carga orgánica nitrogenada**

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -U \times \frac{\partial N}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - k_{rN} \times N_i + wn \quad (2)$$

**Déficit de oxígeno**

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -U \times \frac{\partial D}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} - k_a \times D + k_{rL} \times L + k_{rN} \times N \pm wd \quad (3)$$

**Material inorgánico**

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \times \frac{\partial C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \times C \quad (4)$$

**Condiciones iniciales para ingreso tipo pulso**

Valores en el punto de mezcla

$$L_1(0) \neq 0 \quad N_1(0) \neq 0 \quad D_1(0) \neq 0 \quad C_1(0) \neq 0$$

Valores aguas arriba

$$L_0 = 0 \quad N_0 = 0 \quad D_0(0) \neq 0 \quad C_0 = 0$$

**Condiciones iniciales para ingreso permanente:**

Valores antes del vertido

$$L_1(0) = 0 \quad N_1(0) = 0 \quad D_1(0) \neq 0 \quad C_1 = 0$$

Valores aguas arriba

$$L_0 \neq 0 \quad N_0 \neq 0 \quad D_0(0) \neq 0 \quad C_0 \neq 0$$

Las ecuaciones diferenciales (1), (2), (3) y (4), discretizadas, se transforman en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias



- $L$ : Demanda bioquímica carbonácea de oxígeno  
 $N$ : Demanda bioquímica nitrogenada de oxígeno  
 $D$ : Déficit de oxígeno  
 $C$ : Concentración de carga inorgánica  
 $k$ : Constante de velocidad de reacción del material inorgánico en el cuerpo de agua  
 $U$ : Velocidad media del cuerpo receptor  
 $D_x$ : Coeficiente de dispersión en la dirección del flujo  
 $k_a$ : Coeficiente de reaeración  
 $k_{rL}$ : Coeficiente de remoción de carga orgánica carbonácea  
 $k_{rN}$ : Coeficiente de remoción de carga orgánica nitrogenada  
 $x$ : Distancia  
 $w_d$ : Aportes por fotosíntesis y/o respiración  
 $w_c$ : Cargas difusas de materia carbonácea  
 $w_n$ : Cargas difusas de materia orgánica nitrogenada

**Tabla 1: Valores de los parámetros empíricos para coeficiente de reaeración**

Valores de los parámetros empíricos para el coeficiente de reaeración ( $k_2 = k_a$ ) en función de las constantes de flujo.

Fórmulas	A	B	C	Características físicas del agua
O'Connor y Dobbins (1958)	3,93	0,5	1,5	Ríos profundos y lentos
Churchill y otros (1962)	5,026	0,969	1,673	Corrientes rápidas y de moderada profundidad
Owens y otros (1964)	5,34	0,67	1,85	Corrientes poco profundas

Fuente: Cárdenas (2016)

**Tabla 2: Ecuaciones de las tasas de reaireación**

Ecuaciones predictivas de las tasas de reaireación en ríos como función de parámetros

<b>Autor (es)</b>	<b>(<math>k_a = k_2</math>) (<math>d^{-1}</math> a 20 °C)</b>	<b>Aplicabilidad y observaciones</b>
<b>O'Connor y Dobbins, (1958)</b>	$k_a = 3.93 \times \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$	Profundidad moderada a profunda $0.305 \leq H \leq 9.14$ $0.15 \leq U \leq 0.49$ $0.05 \leq k_a \leq 12.22$
<b>Churchill et. al. (1962)</b>	$k_a = 3.93 \times \frac{U^{0.969}}{H^{1.673}}$	Basado en tasas de reaireación observadas aguas debajo de presas, en las cuales se conocía el déficit de oxígeno. No es aplicable a ríos con pequeñas cascadas (fenómeno de burbujas) $0.61 \leq H \leq 3.35$ $0.55 \leq U \leq 1.5$ $0.225 \leq k_a \leq 5.56$
<b>Krenkely y Orlob, (1962)</b>	$k_a = 173.4 \times \frac{U^{0.408}}{H^{0.66}}$ $k_a = 2750.3 \times \frac{D_L^{1.321}}{H^{2.32}}$	Basado en mediciones realizadas en un canal de 0.305 m. de ancho mediante desoxigenación del agua. $0.02441 \leq H \leq 0.07$ El coeficiente de dispersión longitudinal en el canal ( $D_L$ ) estuvo por debajo del rango esperado en sistemas naturales.
<b>Owens et. al. (1964)</b>	$k_a = 5.34 \times \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$ $k_a = 6.935 \times \frac{U^{0.73}}{H^{1.75}}$	Combinó los datos de sus investigaciones con los datos de Churchill en el 1962 y Gameson en el 1955. Se monitoreó la recuperación del oxígeno en seis ríos en Inglaterra, los cuales fueron desoxigenados con sulfito de sodio.



		$0.122 \leq H \leq 3.35$ $0.0305 \leq U \leq 1.52$ $0.000126 \leq S \leq 0.0106$ $0.31 \leq k_a \leq 49.17$ <p>La segunda ecuación fue propuesta para ríos rápidos y poco profundos, y obtenida con los datos de Water Pollution Research Laboratory (WPRL)</p> $0.122 \leq H \leq 0.7315$ $0.0305 \leq U \leq 0.549$
	$k_a = \frac{55.4 \times F^2 \times U \times S^{0.375}}{0.9 \times F^{1.5} \times H} \coth(\alpha)$ $\alpha = \left[ \frac{4.75 \times U \times S^{0.125}}{0.9 \times F^{0.5}} \right]$	<p>Teoría combinada con mediciones en ríos y datos de canales de Krenkel y Orlob (1963)</p> <p><math>\coth =</math> cotangente hiperbólica del ángulo en radianes</p>
<b>Langbein y Durum (1967)</b>	$k_a = 5.135 \times \frac{U}{H^{1.33}}$	<p>Basado en los datos de O'Connor y Dobbins (1958), Churchill et al (1962), Krenkel y Orlob (1963) y Streeter et al (1936)</p>
<b>Isaac Gaudy (1968)</b>	$k_a = 4.75 \times \frac{U}{H^{1.5}}$	<p>Ecuación desarrollada usando un análisis de regresión a los datos recolectados usando un canal con recirculación en un tanque cilíndrico. Posteriormente la relacionó con los datos de campo de Churchill et al (1962) obteniendo unos nuevos coeficientes.</p>
<b>Negulesku y Rojanski (1969)</b>	$k_a = 10.9 \left( \frac{U}{H} \right)^{0.85}$ $k_a = 352.3 \times D_L \times \left( \frac{U}{H} \right)^{0.85}$	<p>Desarrollado para canales con recirculación y es aplicable con:</p> $H = 0.5$ $U = 1.2$





<b>Trackston y Krenkel (1969)</b>	$k_a = \frac{24.9 \times F^{0.5} \times U}{H}$	Basado en mediciones realizadas en un canal de 0.6 m de ancho, mediante desoxigenación del agua: $0.015 \leq H \leq 0.07$
<b>Cadwallader y McDonnell (1969)</b>	$k_a = 185.5 \times \frac{U \times S^{0.5}}{H}$	Basado en un análisis multivariado de datos de reaireación de Churchill et al (1962), Owens et al (1964) y WPRL (1966) $0.06 \leq H \leq 0.274$ $0.0305 \leq U \leq 0.213$ $0.00004 \leq S \leq 0.00092$ $0.26 \leq k_a \leq 8.5$
<b>Padden y Gloyna (1971)</b>	$k_a = 4.547 \times \frac{U^{0.703}}{H^{1.054}}$	Análisis mediante regresión a datos en los cuales la tasa de reaireación estaba en el rango: $9.8 \leq k_a \leq 28.8$
<b>Parkhurs y Pomeroy (1972)</b>	$k_a = 23.04 \times \frac{10.17 \times F^2 \times S \times U^{3/8}}{H}$	Desarrollado en datos de 12 investigaciones en 12 alcantarillados y ríos
<b>Lau (1972)</b>	$k_a = 2515 \left( \frac{U^*}{U} \right)^3 \left( \frac{U}{H} \right)$	Basado en un nuevo análisis de los datos de Thackston y Krenkel (1969), Krenkel (1960) y Churchill et al (1962), aplicable a ríos con: $H = 0.6 - 0.9$ $U = 0.1524$
<b>Bennett y Rathbun (1972)</b>	$k_a = 32.5 \times \frac{U^{0.413} \times S^{0.273}}{H^{1.408}}$ $k_a = 5.585 \times \frac{U^{0.607}}{H^{1.689}}$	Estas 2 ecuaciones están basadas en unos nuevos análisis de registro de datos históricos. La segunda ecuación predice mejor, pero no tiene el término de la pendiente.
<b>Tsivoglou y Wallace (1972)</b>	$k_a = 0.573 \left( \frac{H}{t} \right)$	Basado en datos de investigaciones realizadas con trazadores radioactivos en cinco ríos.



<b>Bansal (1973)</b>	$k_a = 1,8 \frac{U^{0,6}}{H^{1,4}}$	Basado en un nuevo análisis de los datos de reaeración realizados por Churchill et al (1962), O'Connor y Dobbins (1958) y Langbein y Durum (1967)
<b>Grant (1976)</b>	$k_a = 0,262 \left( \frac{H}{t} \right)$	Basado en datos de 10 pequeños ríos en Winsconsin, usando técnicas de trazadores radioactivos.  $0.008495 \leq Q \leq 1.0477$ $0.000227 \leq S \leq 0.01326$ $2.1 \leq k_a \leq 55$
<b>Foree (1976)</b>	$k_a = 0.266 \times 12.26 S^{1/2}$	La técnica usada fue la de trazadores radioactivos en pequeños ríos en Kentucky $0 \leq S \leq 0.0079548$ $0.38 \leq k_a \leq 23.3$
<b>Tsivoglou y Neal (1976)</b>	$k_a = 0,3609 \left( \frac{H}{t} \right) \quad 0.028 \leq Q \leq 0.28$ $k_a = 0.1772 \left( \frac{H}{t} \right) \quad 0.708 \leq Q \leq 0.85$ $k_a = 13566 \times U \times S$	Basado en datos recolectados en 24 diferentes ríos usando el método de trazadores radioactivos.  KILPATRICK et al, 1989 recomienda utilizar la segunda ecuación de Tsivoglou y Neal para $S = 0.003$
<b>Foree (1977)</b>	$k_a = A \times B$ $A = 0.7809 \times 0.63 \times 7640 \times S^{1.15}$ $B = 91464567 \times q^{0.025}$ <p>Para : <math>5.46 \times 10^{-10} \leq q \leq 1.09 \times 10^{-8}</math></p> $k_a = 0.7809 \times 0.63 \times 153465.5 \times S^{1.5}$ <p>Para : <math>q \leq 1.09 \times 10^{-8}</math></p> $k_a = 0.37 \times 0.63 \times 7640 \times S^{1.15}$ <p>Para: <math>q \leq 1.09 \times 10^{-10}</math></p>	Nuevo análisis a partir de los datos de Foree (1976)



<b>Ice y Brown (1978)</b>	$k_a = 55 \times \frac{W^{2/3} \times S^{1/2} \times U^{7/6} \times g^{1/2}}{Q^{2/3}}$	Basado en datos recolectados en muchos ríos en Oregon, EU
<b>Grant (1978)</b>	$k_a = 0,1748 \left( \frac{H}{t} \right)$	Basado en trazadores radioactivos desarrollado en los ríos Rock, Wisconsin e Illinois $7.36 \leq Q \leq 29.16$ $0.0762 \leq U \leq 0.4877$ $0.000038 \leq S \leq 0.00066$ $0.01 \leq k_a \leq 0.8$
<b>Shindala y Truax (1980)</b>	$k_a = 0,233 \left( \frac{H}{t} \right)$ $Q \leq 0283$ $k_a = 0.1748 \left( \frac{H}{t} \right)$ $0.283 \leq Q \leq 7.93$	Basado en análisis estadísticos de coeficientes de reaeración para siete estados, donde se utilizó el método de trazadores radioactivos.
<b>Long (1983)</b>	$k_a = 1.923 \frac{U^{0,273}}{H^{0,894}}$	Conocida como la reacción de "Texas" basado en datos recolectados en ríos de Texas EU
<b>Parker y Gay (1987)</b>	$k_a = 312 \frac{U^{0,355} \times S^{0.438}}{H^{0,176}}$	Basado en una técnica de regresión múltiple a treinta grupos de datos que contenían características físicas hidrológicas y de calidad de agua
<b>Melching y Flores (1999)</b>	$k_a = 517 \frac{U \times S^{0,524}}{Q^{0,242}}$ para ríos y estanques con $Q \leq 0.566$ $k_a = 596 \frac{US^{0,528}}{Q^{0,136}}$ para ríos y estanques con $Q \leq 0.566$ $k_a = 88 \frac{US^{0,313}}{H^{0,353}}$ para ríos controlados por la forma del canal, con $Q \leq 0.566$	Ecuaciones derivadas a partir de una compilación de datos, obtenidos con el método de trazadores gaseosos, realizada por el USGS Estados Unidos. Este estudio incluyó 493 tramos en 166 ríos en 23 estados.  Después de separar y eliminar las mediciones potencialmente erróneas, el grupo de datos se



	$k_a = 142 \frac{U \times S^{0.333}}{H^{0.66} \times W^{0.243}} \quad \text{para}$ <p>ríos controlados por la forma del canal, con <math>Q \leq 0.566</math></p>	<p>redujo a 370 mediciones, las cuales se dividieron en cuatro grupos, según el caudal del tramo.</p>
<b>Thackston y Dawson (2001)</b>	$k_a = 0.00002519 \times F^{1/4} \times \frac{U^*}{H}$	<p>Realizaron una calibración de la ecuación de Trackston y Krenkel (1969), a partir de los datos de O'Connor y Dobbins (1956), Churchill et al (1962), Parkhurst y Pomeroy (1972), Ruhl y Smoot (1987) y Parker y De Simone.</p> <p>Aplicable a ríos con velocidades bajas, con pequeños números de Froude, sin pequeñas cascadas ni macro rugosidades (rocas grandes)</p>

Fuente: Adaptado de Orduz (2016)

### Cálculo de la constante de desoxigenación ( $k_1 = k_d$ )

En la literatura, no se tiene mucha información en forma de correlaciones sobre las constantes de desoxigenación; se dispone fundamentalmente de datos numéricos comprendidos en ciertos rangos de valores, los cuales deben ser usados para los procesos de modelamiento y simulación en los estudios de calidad de aguas.

Ecuaciones predictivas de las tasas de desoxigenación en río  $k_r = k_1 = k_d + k_s$ ,

$k_1 = k_d$  si  $k_s = 0$



Tabla 3. Ecuaciones de las tasas de desoxigenación

Autor/es	$k_d(a\ 20^{\circ}C)$ $\left[\frac{1}{d\ a}\right]$	Lugar	Método de determinación
Baca et al. (1973)	0.1 - 0.3	Willamette River, OR	
Bauer et al. (1979)	0.16	Chattahoochee River, GA	
Bhargava (1983)	3.5 – 5.6 ( $k_r$ )	Ganga river, India	Campo
	1.4	Yamuna River, India	
Deb and Bowers (1983)	0.4 ( $k_r$ )	Shenandoah River, Mass	Campo
Camp (1965)	0.01 – 0.1	Merrimack River, Mass	Campo
Crane and Malone (1982)	1.44 ( $k_r$ )	Gray's Creek, Louisiana	Calibración de modelo
Greeney and Kraszewski (1981)	0.4	Yampa River, Colorado	Calibración de modelo
Hvitved and Jacobsen (1982)	0.15	Shavad River, Denmark	Campo
	0.90 ( $k_r$ )		
Metropolitan Washington Council of Government (1982)	0.008	Seneca Creek	
Reported Bansal (1975) by	0.02 – 0.60	Kansas (6rivers)	Varios
	0.56 – 3.37	Michigan (3rivers)	
	0.36 – 0.95	Truckee River, Nevada	
	0.30 – 1.25	Virginia (3rivers)	
	0.4	N. Branch, Potomac, WV	
	0.3 – 0.35	South Carolina (3 rivers)	
	0.125 – 0.4	New York (2rivers)	
	0.2 – 0.23	Mew Jersey (3rivers)	
Novotny and Krenkel (1975)	0.4 - 1.5	Holston River, Tennessee	Calibración de modelo



<b>O'Connor et al (1981)</b>	0.05 - 0.25	New York Bight	
<b>Terry et al (1984)</b>	0.004 - 0.66 ( $k_r$ )	Withe River, Arkansas	Laboratorio
<b>Tetra Tech (1976)</b>	0.2	N. Fort King River, CA	
<b>Hydroscience (1971)</b>	0.15	Ouachita River, Arkansas	Calibración
	0.17 ( $k_r$ )		
<b>NCASI (1982a)</b>	0.02 ( $k_1$ )	Ouachita River, Arkansas	Laboratorio
<b>Wright and McDonnell (1979)</b>	0.08 - 4.24	36 U.S river reaches and laboratory flumes	Campo
<b>Chen and Wells (1975)</b>	0.75	Boise River, ID	
<b>Jennings et al (1982)</b>	0.06 - 0.3	W. Fork, Trinity River, TX	Laboratorio
<b>McCrutcheon (1983)</b>	0.07 - 0.14	Willamette River, OR	Laboratorio y Campo
	1.5	31 Arkansas River, CO	
<b>Hydroscience (1972)</b>	0.41	Lower Sacramento River, CA	
<b>Gowda (1983)</b>	1	Speed River, Ontario	Campo

Fuente: Adaptado de Amarilla (2017)

### Concentración de saturación de oxígeno

La solubilidad del oxígeno saturado se encuentra mediante la ecuación de Chapra, 1997 Citado por Sharma et al. (2017) y Zhen-Gang (2008), basado en la APHA (*American Public Health Association*), la concentración del oxígeno en agua pura se obtiene mediante:

$$\ln O_{sf} = -139.3441 + \frac{1.575701 \times 10^5}{T_K} - \frac{6.642308 \times 10^7}{T_K^2} + \frac{1.2438 \times 10^{10}}{T_K^3} - \frac{8.621949 \times 10^{11}}{T_K^4} \quad (5)$$

La concentración de oxígeno en presencia de sales.

$$\ln O_{ss} = \ln O_{sf} - S \left( 1.7674 \times 10^{-2} - \frac{1.0754 \times 10^1}{T_K} + \frac{2.1407 \times 10^3}{T_K^4} \right) \quad (6)$$



S: concentración de sal g/L

(Chapra y Canale, 1998), derivaron una ecuación de regresión para la concentración de saturación:

$$C_s = 0.0035xT^2 - 0.3369xT + 14.407 \quad (7)$$

Cs en mg/L, T, en °C

Otra ecuación para determinar la concentración de oxígeno, incluyendo la salinidad, cuya forma es:

$$C_s = 14.6244 - 0.367134xT + 0.00044972xT^2 + S(-0.0966 + 0.00205xT + 0.0002739xS) \quad (8)$$

Cs en mg/L, T en °C, S en g/L

La solubilidad del oxígeno en el agua, también puede ser obtenido mediante la Ley de Henry, dado por:

$$S = k_H(T) \times P \quad (9)$$

S en mol/L; P (presión parcial de oxígeno) en atm;  $k_H(T)$ , L/mol/atm, constante de la Ley de Henry. Luego, se hace la transformación a mg/L.

La dependencia de la solubilidad del oxígeno con la presión según (Rueda Valdivia, n.d.) Está dada por:

$$O_{sp} = O_{sf} \times P \left[ \frac{(1 - \frac{P_{wv}}{P})(1 - \theta \times P)}{(1 - P_{wv})(1 - \theta)} \right] \quad (10)$$

$$\ln P_{wv} = 11.8571 - \frac{3840.70}{T_K} - \frac{216.961}{T_K^2} \quad (11)$$

$$\theta = 0.0000975 - 1.426 \times 10^{-5} \times T + 6.436 \times 10^{-8} \times T^2 \quad (12)$$



La concentración de oxígeno instantáneo se obtiene por diferencia entre la concentración de oxígeno saturado en el medio y el déficit instantáneo, es decir:

$$C_o = C_s - D \quad (13)$$

**Tabla 4: El coeficiente de dispersión longitudinal.**

Se obtiene mediante correlaciones

AUTOR	CORRELACION PROPUESTA
<b>Mc Quivey y Keefer</b>	$E = 0.058 \times \frac{Q}{(S \times B)} \text{ para } F \leq 0.5$
<b>Fisher</b>	$E = 0.011 \times \frac{U^2 \times B^2}{H \times U^*}$
<b>Seo y Cheong</b>	$E = 5.915 \times H \times U^* \left( \frac{B}{H} \right)^{0.620} \left( \frac{U}{U^*} \right)^{1.428}$
<b>Koussis y Rodríguez-Mirasol</b>	$E = 0.6 \times \frac{U^* \times B^2}{H}$
<b>Kashefipour and Falconer (a)</b>	$E = 10.612 \times H \times U \left( \frac{U}{U^*} \right)$
<b>Kashefipour and Falconer (b)</b>	$E = \left[ 7.428 + 1.775 \left( \frac{B}{H} \right)^{0.620} \left( \frac{U^*}{U} \right)^{0.572} \right] H \times U \left( \frac{U}{U^*} \right)$

Jiménez (2008)

**Otras correlaciones para el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal**

Elder (1959):

$$D_L = 5.93 \times H \times U^* \quad (14)$$

Fischer (1967) señaló que esta ecuación subestima significativamente  $D_L$ .

$$D_L = 0.011 \times \left( \frac{W}{H} \right)^2 \times \left( \frac{U}{U^*} \right)^2 \times U \times H \quad (15)$$





Mc Quivey and Keefer (1974):

$$D_L = 0.058 x g x \left(\frac{H}{U^*}\right)^2 x U x H \quad (16)$$

Liu (1977):

$$D_L = 0.18 x \left(\frac{U^*}{U}\right)^{15} x (U x W)^2 / (U^* x H) \quad (17)$$

Liu señala que con su modelo se puede valorar  $D_L$  con un error de hasta seis veces entre el valor observado y el estimado

Iwasa and Aya (1991)

$$D_L = 2 \left(\frac{W}{H}\right)^{15} U^* H \quad (18)$$

Seo and Cheong (1998)

$$D_L = 5.92 x \left(\frac{U}{U^*}\right)^{1.43} x (W/H)^{0.62} x (U^* x H) \quad (19)$$

Vargas Baecheler (2001)

$$D_L = 7.39 x \left(\frac{W}{H}\right)^{-1.86} (W U)^2 x (U^*/H) \quad (20)$$

Para ríos anchos (máximo  $W/L$  experimental: 150)

Deng et al. (2001)

$$D_L = 0.111 x \left(\frac{W}{H}\right)^{\frac{5}{3}} x \left(\frac{U}{U^*}\right)^2 x (U^* H) / Eps \quad (21)$$

$Eps = 0.145 + 0.00028 x \left(\frac{W}{H}\right)^{1.38} x \left(\frac{U}{U^*}\right)$ . Aplicable para  $W/H$  mayor de 10

and Falconer (2002) Kashefipour

$$D_L = 10.06 x \left(\frac{U}{U^*}\right) x U x H \quad (22)$$



Según su análisis, el modelo de Fischer, (1975) sobreestima el coeficiente de dispersión longitudinal. Propusieron que la ecuación anterior sea usada para valores de  $W/H$  mayores a 50.

Tavakollizadeh and Kashefipour (2007):

$$D_L = 7.428 \times 1.775 \left( \frac{U}{U^*} \right)^{1.752} \times \left( \frac{W}{H} \right)^{0.62} \times (U^* H) \quad (23)$$

Rajeev and Dutta (2009):

$$D_L = 2 \times \left( \frac{W}{H} \right)^{0.96} \times \left( \frac{U}{U^*} \right)^{1.25} \times (UH), \text{ para } W/H > 50 \quad (24)$$

Seo and Cheong (1998), Deng et al. (2001) y Kashefipour and Falconer (2002) funcionan bien si los valores de  $D_L$  mayores a 100 m<sup>2</sup>/s son excluidos del análisis. El parámetro más efectivo para establecer una buena predicción de  $D_L$ , es  $U/U^*$

Tayfur (2009)

$$D_L = 0.91 \times WHU + 9.94 \quad (25)$$

Etemad-Shahidi and Taghipour (2012):

$$D_L = 14.12 \times \left( \frac{U}{U^*} \right)^{0.85} \times \left( \frac{W}{H} \right)^{0.61} \times (U^* H), \text{ para } W/H > 30 \quad (26)$$

Las unidades son las mismas que las de la tabla anterior.

### **3.6. Método de análisis de datos**

La presente tesis no requiere un análisis estadístico, pues los resultados están basados en la ecuación de conservación de materia, que es una ecuación universal comprobada.

### **3.7. Rigor científico**

En nuestra tesis se ha aplicado los cuatro criterios de rigurosidad científica (Cádiz, 2016); es veritativo, dado que hemos sido rigurosas en la búsqueda de la verdad, para obtener resultados verídicos, se han controlado factores que pudieran interferir en la transparencia e interpretación de los resultados. Sobre la aplicabilidad, se han cautelado los factores del modelo para que puedan ser aplicados a otros estudios en condiciones similares. El modelo y los resultados tienen consistencia, puede aplicar el modelo a casos similares esperando resultados similares, además se puede observar la similitud en el perfil de los gráficos obtenidos y sobre la neutralidad se garantiza que los resultados sean producto del desarrollo riguroso de la investigación y no de los intereses personales.

### **3.8. Aspectos éticos**

Se realizó mediante la norma establecida por la Resolución de Consejo Universitario N° 126 – 2017 / UCV, La investigación compilada para el soporte de la tesis fue citada y referenciada con la Norma ISO 690, con motivo de respetar los derechos de autor. La tesis fue desarrollada de tal manera que su elaboración sirva para las personas interesadas que desean realizar consultas con la finalidad de continuar con la investigación y así también realizar las predicciones en diversos tipos de cursos de agua previo estudio experimental.



## **IV. RESULTADOS**



### Respecto al modelamiento.

El modelamiento se ha realizado de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Se ha considerado como contaminantes los provenientes de la actividad del narcotráfico, cuyos efluentes contienen carga orgánica carbonosa y nitrogenada; además material inorgánico, como las sales que utilizan en sus procesos.
- Se ha considerado la dispersión de estos contaminantes mediante los procesos de advección, difusión y reacción.
- La dispersión de los contaminantes aplicados en la presente tesis está dada para régimen turbulento, es decir que el flujo de agua no presenta perfiles de velocidad.
- Se ha considerado las correlaciones para el cálculo de la solubilidad del oxígeno, su variación con la temperatura, presión y contenido de sal del cuerpo de agua receptor.
- El modelamiento se sustenta en la ecuación de Streeter-Phelps modificada.
- Se analizaron los casos de ingreso instantáneo e ingreso permanente de contaminantes al cuerpo receptor.
- Las ecuaciones y condiciones involucradas en el modelamiento se describen a continuación.

Carga orgánica carbonácea:

$$\frac{dL_i}{dt} = -U \times \frac{L_i - L_{i-1}}{\Delta x} + D_x \frac{L_{i+1} - 2L_i + L_{i-1}}{\Delta x^2} - k_{rL} \times L_i + wc_i \quad (27)$$

Carga orgánica nitrogenada:

$$\frac{dN_i}{dt} = -U \times \frac{N_i - N_{i-1}}{\Delta x} + D_x \frac{N_{i+1} - 2N_i + N_{i-1}}{\Delta x^2} - k_{rN} \times N_i + wni \quad (28)$$



Déficit de oxígeno:

$$\frac{dD_i}{dt} = -U \times \frac{D_i - D_{i-1}}{\Delta x} + D_x \frac{D_{i+1} - 2D_i + D_{i-1}}{\Delta x^2} - k_a \times D_i + k_{rL} \times L_i + k_{rN} \times N_i \pm wd_i \quad (29)$$

Material inorgánico:

$$\frac{dC_i}{dt} = -U \times \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta x} + D_x \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{\Delta x^2} - k \times C_i \quad (30)$$

Condiciones iniciales para ingreso tipo pulso:

Valores en el punto de mezcla

$$L_1(0) \neq 0 \quad N_1(0) \neq 0 \quad D_1(0) \neq 0 \quad C_1(0) \neq 0$$

Valores aguas arriba

$$L_0 = 0 \quad N_0 = 0 \quad D_0(0) \neq 0 \quad C_0 = 0$$

Condiciones iniciales para ingreso permanente:

Valores antes del vertido

$$L_1(0) = 0 \quad N_1(0) = 0 \quad D_1(0) \neq 0 \quad C_1 = 0$$

Valores aguas arriba

$$L_0 \neq 0 \quad N_0 \neq 0 \quad D_0(0) \neq 0 \quad C_0 \neq 0$$

Este conjunto de ecuaciones diferenciales y parciales se resuelve transformándolas a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, en el cual:

Los parámetros para utilizar son las ecuaciones del (5) al (26).

## Resultados de la simulación del programa

### A- INGRESO NO PERMANENTE (PULSO)

**Tabla 5: Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea en función a la distancia y el tiempo de dispersión.**

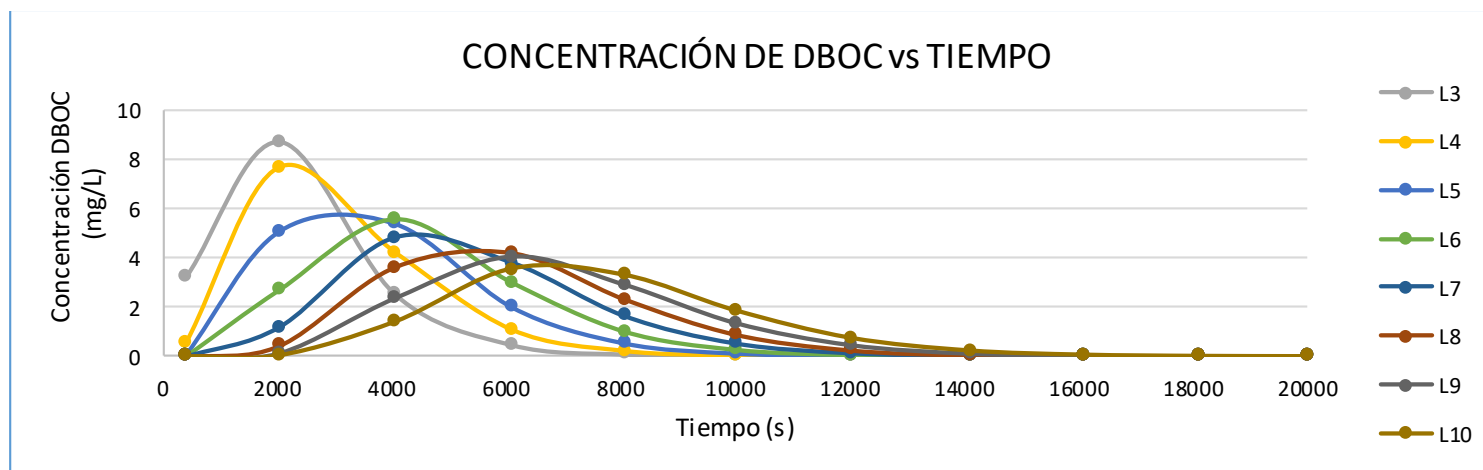
CONCENTRACIÓN DE DBOC - NO PERMANENTE											
TIEMPO	t(s)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
T0	<b>406.9784</b>	22.65677	12.06408	3.21544	0.5715938	0.076224	0.0081328	0.0007232	5.51E-05	3.68E-06	2.19E-07
T1	<b>2044.847</b>	2.619416	6.66064	8.690376	7.640304	5.065245	2.694874	1.197151	0.4564403	0.1524201	0.0457031
T2	<b>4064.244</b>	0.2343161	1.040356	2.511139	4.194064	5.357953	5.539761	4.80857	3.595571	2.36125	1.399559
T3	<b>6101.445</b>	0.0249138	0.1414914	0.4642449	1.089145	1.992451	2.985942	3.787136	4.16111	4.032402	3.528463
T4	<b>8064.917</b>	0.0032314	0.0208055	0.081182	0.2334371	0.5337548	1.013022	1.642142	2.32133	2.908132	3.278233
T5	<b>1.00E+04</b>	0.0004594	0.0031891	0.013905	0.0458381	0.1223593	0.2746711	0.5316651	0.9037949	1.368254	1.851862
T6	<b>1.20E+04</b>	6.40E-05	0.0004677	0.0022068	0.0080455	0.0241484	0.0617271	0.1373735	0.2704779	0.4764416	0.7436512
T7	<b>1.41E+04</b>	8.79E-06	6.66E-05	0.0003332	0.0013105	0.0043052	0.0121851	0.0303052	6.72E-02	1.34E-01	2.33E-01
T8	<b>1.61E+04</b>	1.36E-06	1.05E-05	5.49E-05	2.28E-04	0.0008016	0.0024491	0.0066277	0.0160804	0.0351255	0.0665691
T9	<b>1.81E+04</b>	2.03E-07	1.61E-06	8.69E-06	3.77E-05	1.40E-04	0.0004555	0.0013226	0.0034615	0.0081693	0.0165475
T10	<b>2.00E+04</b>	3.61E-08	2.91E-07	1.61E-06	7.21E-06	2.78E-05	9.50E-05	2.91E-04	0.0008071	0.0020189	0.0042938
	DISTANCIA (m)	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600

Fuente: Elaboración propia a partir de la ejecución del programa Polymath

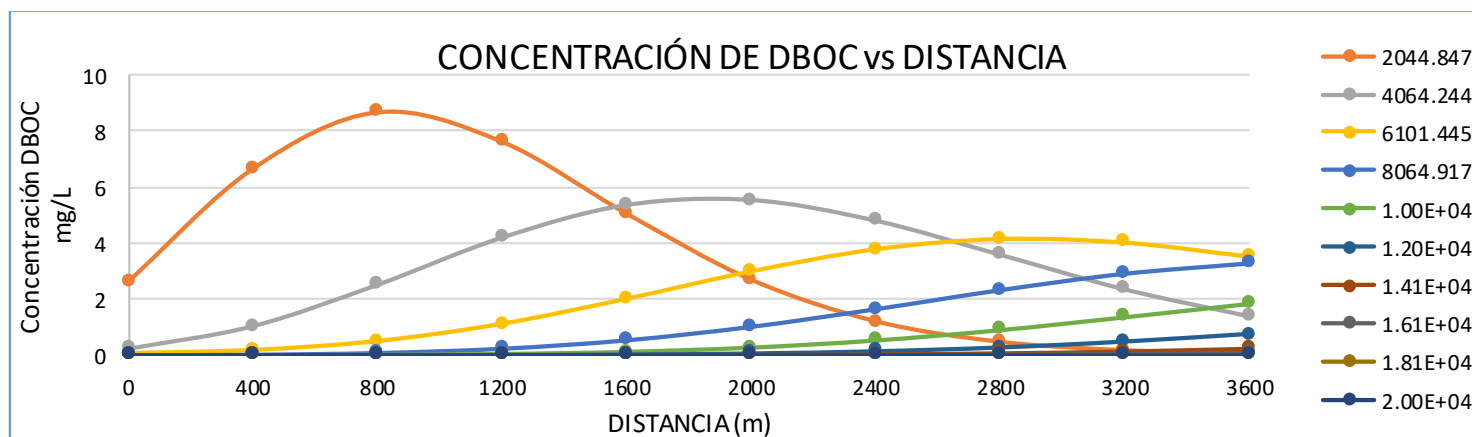
La Tabla 5 muestra los datos de concentración de demanda bioquímica de oxígeno carbonácea en función al tiempo para cada longitud. Se observa una distribución de concentración del contaminante, donde en los tramos finales la concentración es ligeramente mayor respecto a los primeros tramos, lo cual es concordante con los valores esperados, dado que aguas arriba el flujo de agua es libre de contaminantes, motivo por el cual se depura antes que los tramos finales. A partir de esta tabla se construye también el Perfil de concentración en función de la distancia para cada tiempo

Figura 5: Perfil de concentración de la demanda bioquímica carbonácea de oxígeno en función al tiempo y la distancia

(a): Concentración de DBOC en función al tiempo para cada posición longitudinal, (b): Concentración de DBOC en función a la distancia para cada tiempo.



(a)



(b)



La figura 5 es una representación gráfica de la Tabla 5, donde (a) se ha representado la concentración vs el tiempo manteniendo como parámetro la posición longitudinal, y en (b) se ha representado la concentración de DBO carbonácea en función a la distancia manteniendo como parámetro el tiempo. En ambos casos se observa una familia de curvas, cuyo comportamiento global es ascendente descendente; es decir una familia de curvas tipo gaussiana.

**Tabla 6: Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada en función a la distancia y el tiempo de dispersión.**

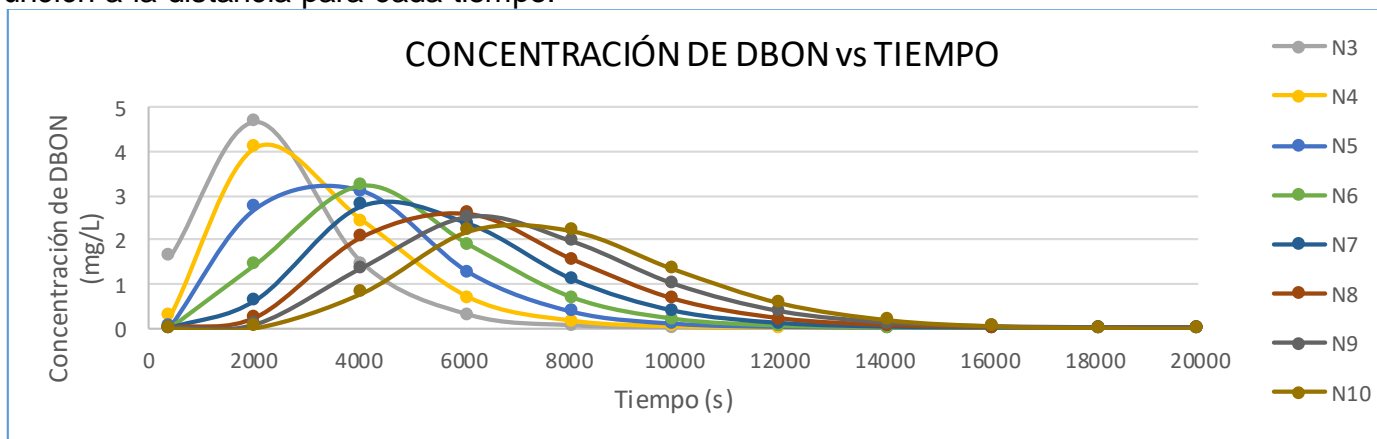
CONCENTRACIÓN DE DBON - NO PERMANENTE											
TIEMPO	t(s)	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
T0	<b>406.9784</b>	11.49773	6.122211	1.631753	0.2900691	0.0386817	0.0041272	0.000367	2.80E-05	1.87E-06	1.11E-07
T1	<b>2044.847</b>	1.411081	3.58809	4.68151	4.115836	2.72865	1.45173	0.644906	0.2458846	0.0821088	0.0246203
T2	<b>4064.244</b>	0.1358701	0.6032588	1.456105	2.431963	3.106853	3.212276	2.788289	2.084922	1.36919	0.8115456
T3	<b>6101.445</b>	0.0155603	0.0883707	0.2899515	0.6802429	1.244416	1.864917	2.365315	2.598887	2.5185	2.203757
T4	<b>8064.917</b>	0.002168	0.0139587	0.0544661	0.1566163	0.3581038	0.6796508	1.101737	1.557414	1.951108	2.199414
T5	<b>1.00E+04</b>	0.0003309	0.0022969	0.010015	0.0330148	0.0881291	0.1978314	0.3829309	0.6509569	0.9854825	1.3338
T6	<b>1.20E+04</b>	4.96E-05	0.0003626	0.0017109	0.0062375	0.0187217	0.0478555	0.1065023	0.209695	0.3693737	0.5765348
T7	<b>1.41E+04</b>	7.35E-06	5.57E-05	0.0002786	0.0010959	0.0036	0.0101893	0.0253414	5.62E-02	1.12E-01	1.95E-01
T8	<b>1.61E+04</b>	1.22E-06	9.47E-06	4.94E-05	2.05E-04	0.0007206	0.0022016	0.005958	0.0144556	0.0315763	0.0598427
T9	<b>1.81E+04</b>	1.97E-07	1.56E-06	8.41E-06	3.65E-05	1.36E-04	0.0004411	0.0012806	0.0033517	0.00791	0.0160224
T10	<b>2.00E+04</b>	3.74E-08	3.01E-07	1.66E-06	7.47E-06	2.89E-05	9.85E-05	3.02E-04	0.0008367	0.002093	0.0044513
	DISTANCIA (m)	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600

Fuente: Elaboración propia a partir de la ejecución del programa Polymath

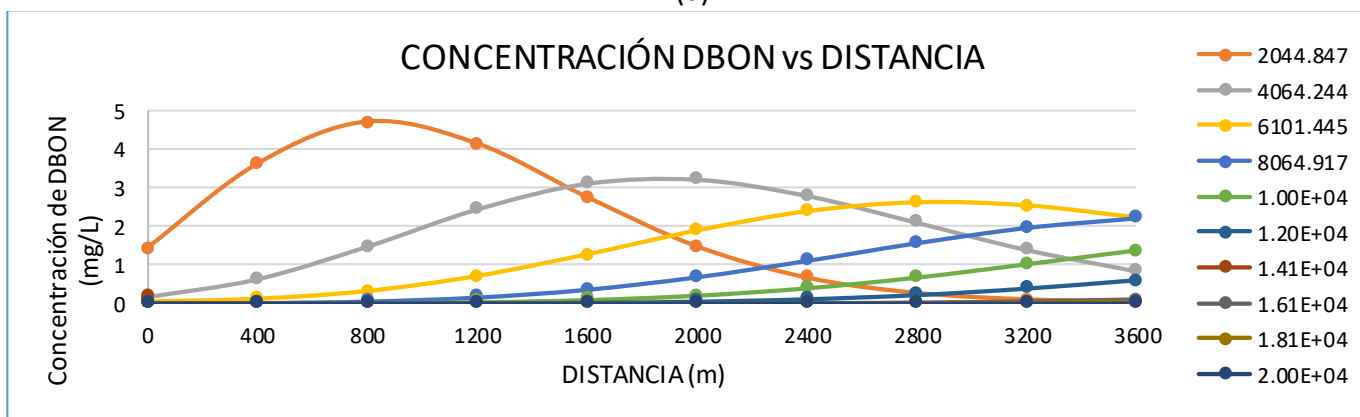
La Tabla 6 muestra los datos de concentración de demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada en función al tiempo para cada longitud. Se observa una distribución de concentración del contaminante, donde en los tramos finales la concentración es ligeramente mayor respecto a los primeros tramos, lo cual es concordante con los valores esperados. dado que aguas arriba el flujo de agua es libre de contaminantes, motivo por el cual se depura antes que los tramos finales. A partir de esta tabla se construye también el Perfil de concentración en función de la distancia para cada tiempo.

Figura 6: Perfil de concentración de la demanda bioquímica nitrogenada de oxígeno en función al tiempo y la distancia

(a): Concentración de DBON en función al tiempo para cada posición longitudinal, (b): Concentración de DBON en función a la distancia para cada tiempo.



(a)



(b)

La figura 6 es una representación gráfica de la Tabla 6, donde en (a) se ha representado la concentración vs el tiempo manteniendo como parámetro la posición longitudinal, y en (b) se ha representado la concentración de DBO nitrogenada en función a la distancia manteniendo como parámetro el tiempo. En ambos casos se observa una familia de curvas, cuyo comportamiento global es ascendente descendente; es decir una familia de curvas tipo gaussiana.

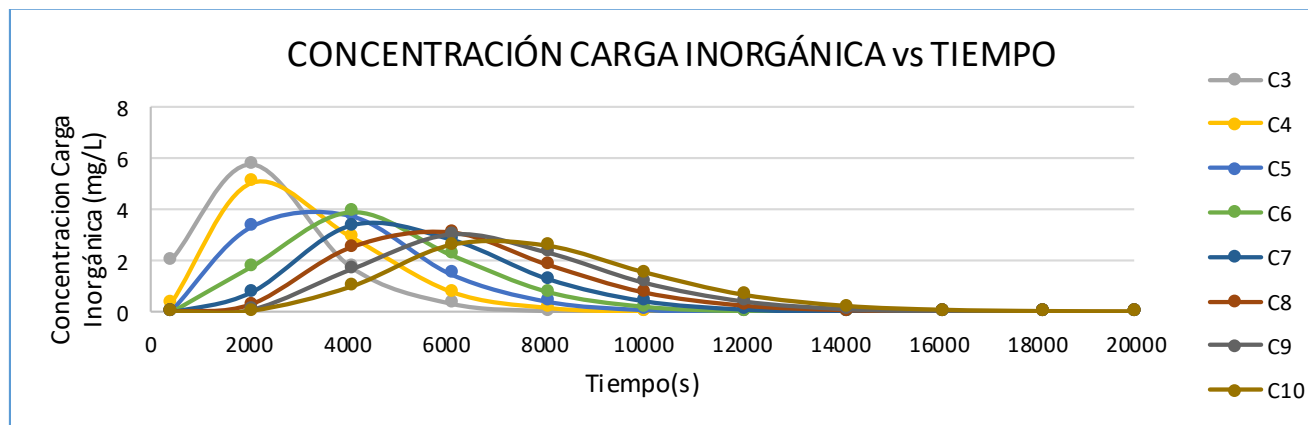
**Tabla 7: Concentración de la sustancia inorgánica en función a la distancia y el tiempo de dispersión.**

CONCENTRACIÓN DE CARGA INORGÁNICA - NO PERMANENTE											
TIEMPO	t(s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
T0	406.9784	14.33741	7.634257	2.034759	0.3617095	0.0482352	0.0051465	0.0004576	3.49E-05	2.33E-06	1.38E-07
T1	2044.847	1.742524	4.430882	5.781131	5.082588	3.369571	1.792721	0.7963854	0.3036395	0.101395	0.0304033
T2	4064.244	0.1657805	0.7360598	1.776651	2.967333	3.790794	3.919424	3.402101	2.543895	1.670603	0.9901987
T3	6101.445	0.018757	0.1065257	0.3495195	0.8199928	1.500071	2.248048	2.851248	3.132805	3.035904	2.6565
T4	8064.917	0.0025831	0.016631	0.0648933	0.1865993	0.42666	0.8097649	1.312656	1.855569	2.324633	2.620475
T5	1.00E+04	0.0003897	0.0027052	0.011795	0.0388825	0.103792	0.2329915	0.4509883	0.7666498	1.16063	1.570853
T6	1.20E+04	5.78E-05	0.0004219	0.0019909	0.0072583	0.0217858	0.0556877	0.1239329	0.2440145	0.4298268	0.6708927
T7	1.41E+04	8.45E-06	6.41E-05	0.0003203	0.0012596	0.0041378	0.0117114	0.029127	6.45E-02	1.28E-01	2.24E-01
T8	1.61E+04	1.38E-06	1.08E-05	5.61E-05	2.33E-04	0.0008185	0.0025008	0.0067677	0.01642	0.0358674	0.067975
T9	1.81E+04	2.21E-07	1.75E-06	9.44E-06	4.10E-05	1.52E-04	0.000495	0.0014371	0.0037613	0.0088767	0.0179805
T10	2.00E+04	4.15E-08	3.34E-07	1.85E-06	8.29E-06	3.20E-05	1.09E-04	3.35E-04	0.0009285	0.0023228	0.0049399
	DISTANCIA (m)	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600

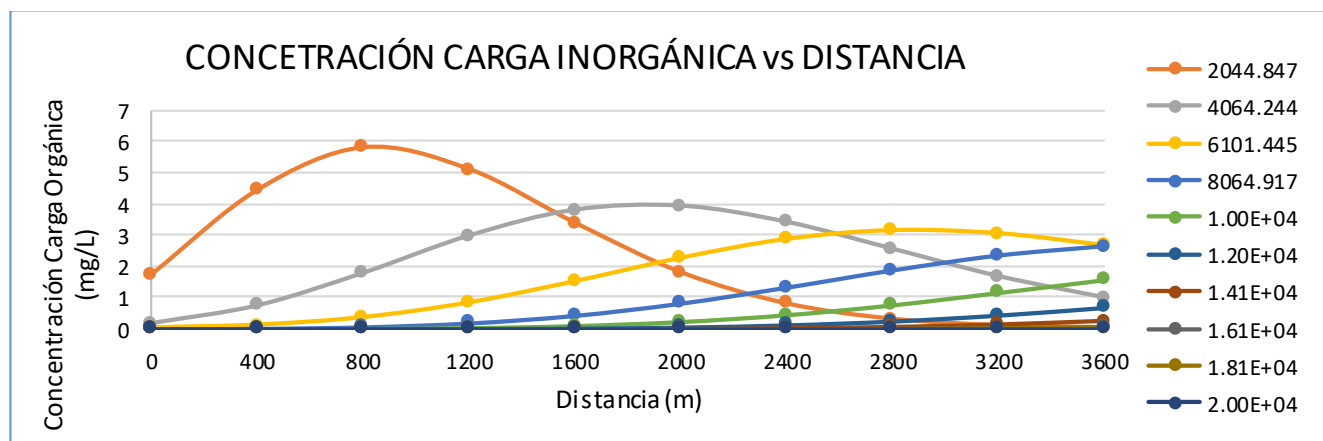
Fuente: Elaboración propia a partir de la ejecución del programa Polymath

La Tabla 7 muestra los datos de concentración de materia inorgánica en función al tiempo para cada longitud (distancia). Se observa una distribución de concentración del contaminante, donde en los tramos finales la concentración es ligeramente mayor respecto a los primeros tramos, lo cual es concordante con los valores esperados, pues el proceso de dispersión hace que el contaminante sea arrastrado aguas abajo. También a partir de esta tabla se construye también el Perfil de concentración en función de la distancia para cada tiempo.

Figura 7: Perfil de concentración del material inorgánico en función al tiempo y la distancia, donde (a): Concentración de materia inorgánica en función al tiempo para cada posición longitudinal, (b): Concentración de materia inorgánica en función a la distancia para cada tiempo.



(a)



(b)

La figura 7 es una representación gráfica de la Tabla 7, donde en (a) se ha representado la concentración de materia inorgánica en función al tiempo manteniendo como parámetro la longitud y en (b) se ha representado la concentración vs distancia manteniendo como parámetro el tiempo. En ambos casos se observa una familia de curvas, cuyo comportamiento global es ascendente descendente; es decir una familia de curvas tipo gaussiana.

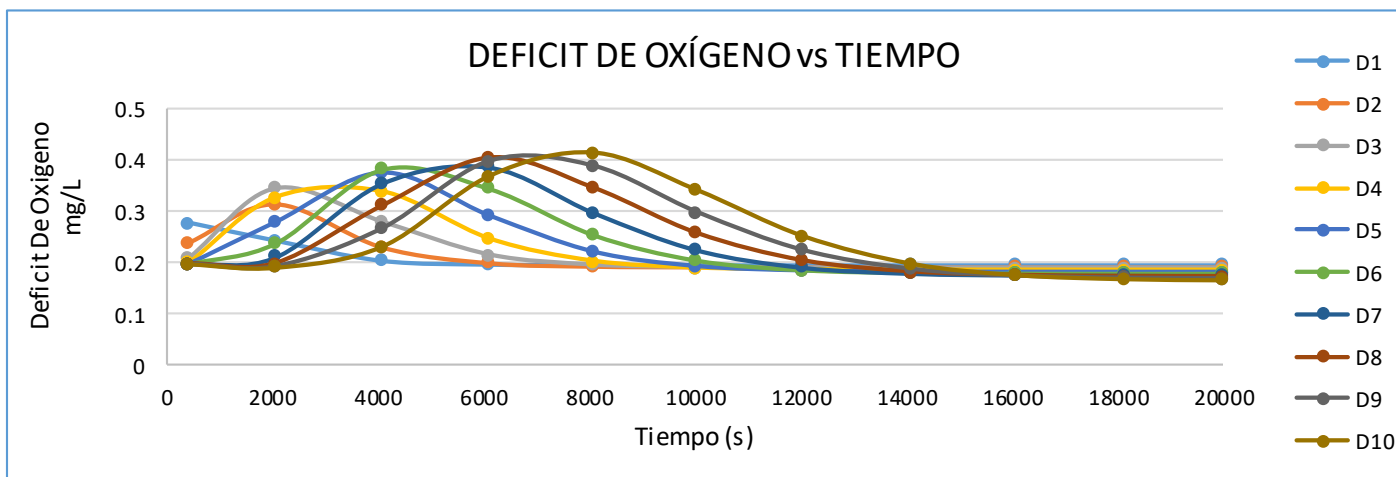
**Tabla 8: Déficit de oxígeno en función a la distancia y el tiempo de dispersión.**

DÉFICIT DE OXÍGENO - NO PERMANENTE											
TIEMPO	t(s)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
T0	406.9784	0.2772831	0.2401151	0.2093016	0.200105	0.1983825	0.1981458	0.19812	1.98E-01	1.98E-01	1.98E-01
T1	2044.847	0.2431283	0.3122151	0.3465189	0.3269557	0.2808385	0.2386133	0.2119824	0.1988232	0.1934246	0.1915302
T2	4064.244	0.2048104	0.2303605	0.2801432	0.3380495	0.3778956	0.383035	0.3558606	0.3117392	0.2670934	0.2323897
T3	6101.445	0.1977287	0.2005881	0.2149174	0.2460662	0.2928209	0.3449193	0.3868858	0.4058154	0.3975279	0.3689848
T4	8064.917	0.1965934	0.1943201	0.1952975	0.2031825	0.2221757	0.2546199	0.2984233	0.3462538	0.387603	0.4133243
T5	1.00E+04	0.1963963	0.1930728	0.190566	0.1901208	0.193939	0.2049663	0.2259431	0.2578917	0.2987246	0.3417051
T6	1.20E+04	1.96E-01	0.1928267	0.1895122	0.1867347	0.1852046	0.1862159	0.1916864	0.2038627	0.2245453	0.2525353
T7	1.41E+04	1.96E-01	1.93E-01	0.1893037	0.1859876	0.183013	0.180775	0.1800126	1.82E-01	1.88E-01	1.99E-01
T8	1.61E+04	1.96E-01	1.93E-01	1.89E-01	1.86E-01	0.1825474	0.1794858	0.1768918	0.1752055	0.1751267	0.1772331
T9	1.81E+04	1.96E-01	1.93E-01	1.89E-01	1.86E-01	1.82E-01	0.1791765	0.1760711	0.1732607	0.1709898	0.169588
T10	2.00E+04	1.96E-01	1.93E-01	1.89E-01	1.86E-01	1.82E-01	1.79E-01	1.76E-01	0.1727887	0.1698994	0.1674212
	DISTANCIA (m)	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600

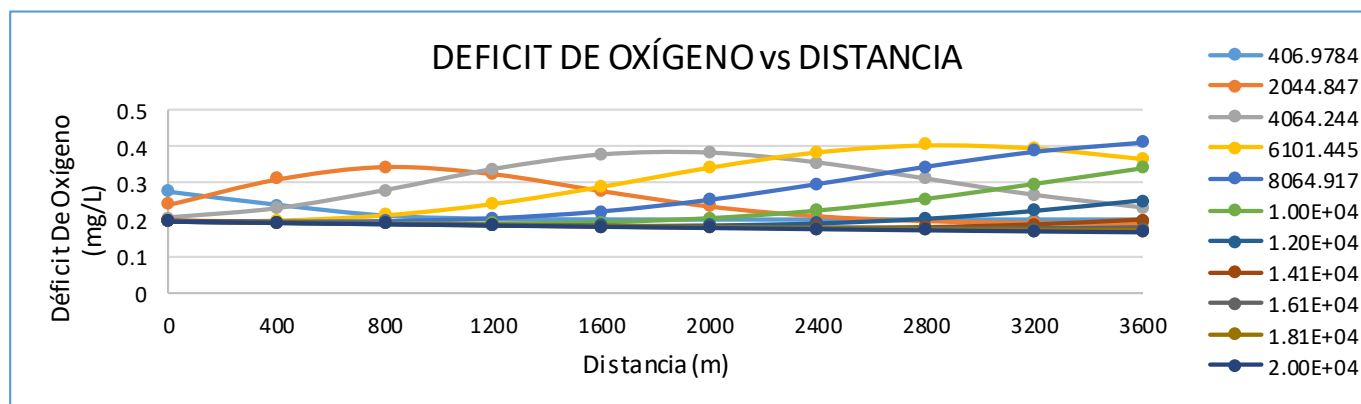
Fuente: Elaboración propia a partir de la ejecución del programa Polymath

La Tabla 8 muestra los datos de déficit de oxígeno en función al tiempo para cada longitud. Se observa una distribución de déficit; un incremento del déficit y luego un descenso, lo que significa que el agua se está autodepurando.

Figura 8: Perfil de déficit de oxígeno en función al tiempo y la distancia, donde (a): Déficit de oxígeno en función al tiempo para cada posición longitudinal y (b): Déficit de oxígeno en función a la distancia para cada tiempo.



(a)



(b)

La Figura 8 es una representación gráfica de la Tabla 8, donde (a) se ha representado la concentración vs el tiempo manteniendo como parámetro la posición longitudinal y en (b) se ha representado el déficit de oxígeno en función a la distancia manteniendo como parámetro el tiempo. En ambos casos se observa una familia de curvas, cuyo comportamiento global es ascendente descendente; es decir una familia de curvas tipo gaussiana.

## B.- INGRESO PERMANENTE (CONTINUO)

**Tabla 9: Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea en función a la distancia y el tiempo de dispersión.**

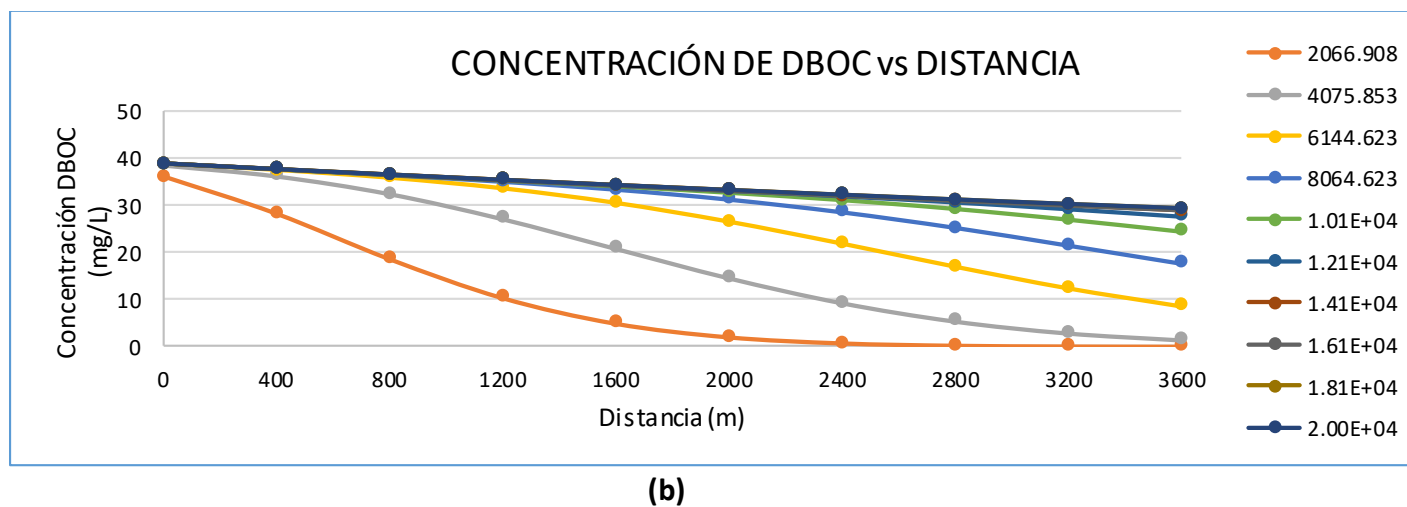
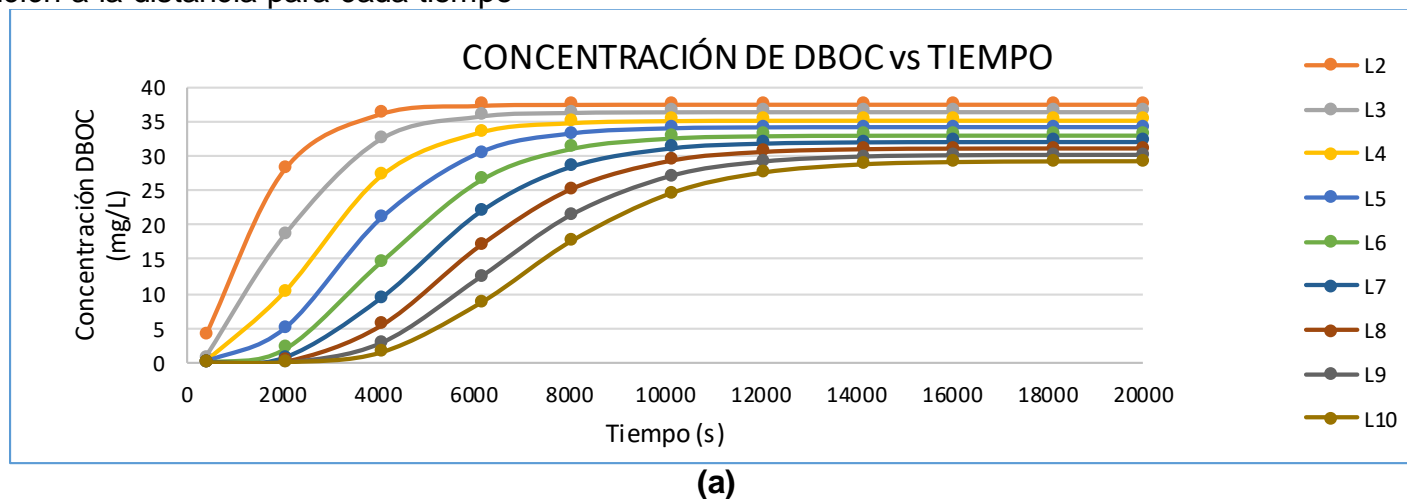
CONCENTRACION DE DBOC - PERMANENTE											
TIEMPO	t(s)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
T0	402.0998	16.11902	3.849664	0.643307	0.0822586	0.0085004	0.0007363	5.49E-05	3.59E-06	2.09E-07	1.10E-08
T1	2066.908	35.97381	28.11644	18.53747	10.30689	4.889947	2.008904	0.7248167	0.2325719	0.0670901	0.0177149
T2	4075.853	38.47185	36.1517	32.41398	27.11592	20.84309	14.61099	9.324399	5.426894	2.891243	1.4334
T3	6144.623	38.71628	37.34953	35.69539	33.46366	30.39858	26.43834	21.80138	16.93213	12.34214	8.528522
T4	8064.623	38.74203	37.50349	36.23795	34.85038	33.19303	31.09433	28.421	25.14742	21.39942	17.57796
T5	1.01E+04	38.74572	37.52794	36.33772	35.15377	33.93322	32.60452	31.06991	29.22312	26.98666	24.47228
T6	1.21E+04	38.74617	37.53118	36.35236	35.20422	34.07512	32.94239	31.76737	30.49348	29.05489	27.47533
T7	1.41E+04	38.74625	37.53173	36.35497	35.21404	34.1057	33.02383	31.9571	30.88607	29.78361	28.67007
T8	1.61E+04	38.74626	37.5318	36.35536	35.21558	34.11089	33.03898	31.99608	30.97572	29.96908	29.0053
T9	1.81E+04	38.74626	37.53181	36.35542	35.21588	34.11193	33.04224	32.00516	30.99839	30.02013	29.10463
T10	2.00E+04	38.74626	37.53182	36.35543	35.21592	34.1121	33.0428	32.0068	31.0028	30.03079	29.12667
	DISTANCIA (m)	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600

Fuente: Elaboración propia a partir de la ejecución del programa Polymath

La Tabla 9 muestra los datos de concentración de demanda bioquímica de oxígeno carbonácea en función al tiempo para cada longitud. Se observa una distribución de concentración del contaminante, cuyo valor se va incrementando constantemente, debido al ingreso permanente de materia orgánica carbonácea proveniente de una fuente.

Figura 9: Perfil de concentración de la demanda bioquímica carbonácea de oxígeno en función al tiempo y la distancia

(a): Concentración de DBOC en función al tiempo para cada posición longitudinal, (b): Concentración de DBOC en función a la distancia para cada tiempo





La Figura 9 ha sido obtenida a partir de los datos de la Tabla 9; en (a) se observa la concentración de DBO carbonácea en función al tiempo considerando la distancia como parámetro y en (b) se observa la concentración de DBO carbonácea en función a la distancia para cada tiempo como parámetro. A largo plazo se observa que la concentración en cada tramo se estabiliza en un determinado valor, haciendo que el cuerpo receptor no pueda auto depurarse.

**Tabla 10: Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada en función a la distancia y el tiempo de dispersión.**

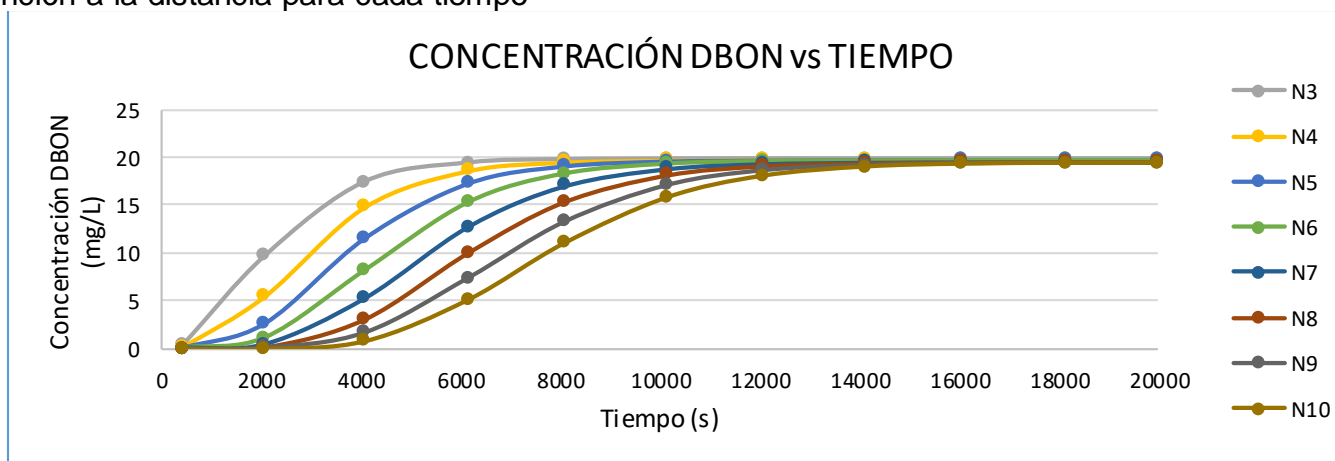
CONCENTRACION DE DBON- PERMANENTE											
TIEMPO	t(s)	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
T0	402.0998	8.113331	1.942825	0.3251055	0.041605	0.0043017	0.0003727	2.78E-05	1.82E-06	1.06E-07	5.56E-09
T1	2066.908	18.39209	14.5925	9.714294	5.435285	2.589707	1.067118	0.3858683	0.1240205	0.0358228	0.0094687
T2	4075.853	19.77062	19.03938	17.41954	14.80266	11.51313	8.141817	5.230199	3.059284	1.636186	0.813661
T3	6144.623	19.91595	19.75253	19.3765	18.59569	17.23509	15.24013	12.73578	9.996565	7.348078	5.111498
T4	8064.623	19.93246	19.85126	19.72472	19.48666	19.03261	18.23885	17.00489	15.3021	13.20572	10.97232
T5	1.01E+04	19.935	19.8681	19.79348	19.69591	19.5436	19.28249	18.83747	18.12507	17.08033	15.75902
T6	1.21E+04	19.93534	19.87051	19.80435	19.73338	19.64907	19.53376	19.35653	19.07121	18.62193	17.99909
T7	1.41E+04	19.93539	19.87094	19.80643	19.74122	19.67347	19.59879	19.50813	19.38511	19.205	18.95566
T8	1.61E+04	19.9354	19.871	19.80676	19.74254	19.67793	19.61182	19.54166	19.46226	19.3647	19.24444
T9	1.81E+04	19.9354	19.87102	19.80683	19.74281	19.67889	19.61483	19.55005	19.48322	19.4119	19.33632
T10	2.00E+04	19.9354	19.87102	19.80684	19.74286	19.67906	19.61538	19.55169	19.48761	19.42251	19.35825
	DISTANCIA	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600

Fuente: Elaboración propia a partir de la ejecución del programa Polymath

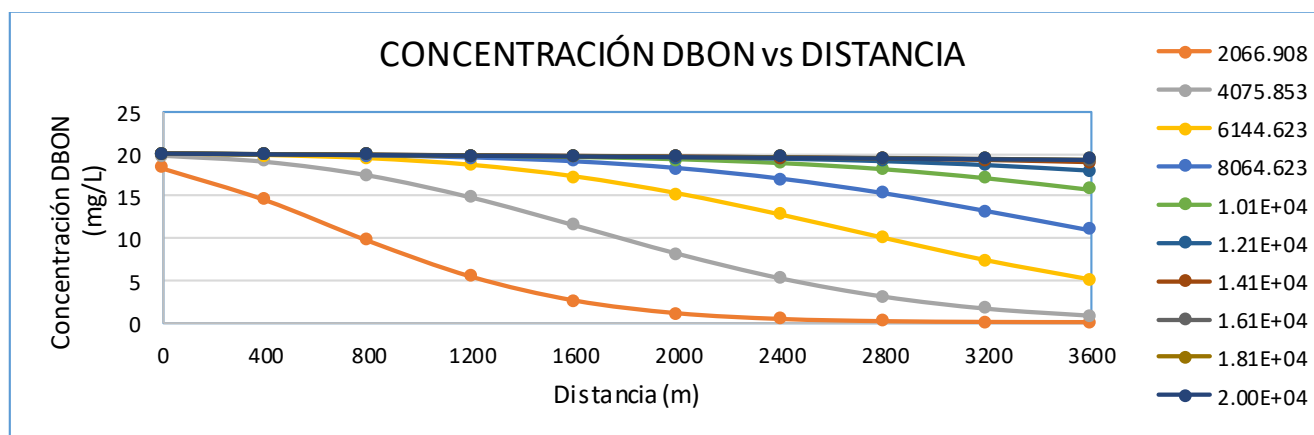
La Tabla 10 muestra los datos de concentración de demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada en función al tiempo para cada longitud. Se observa una distribución de concentración del contaminante, cuyo valor se va incrementando constantemente, debido al ingreso permanente de materia orgánica nitrogenada proveniente de una fuente.

Figura 10: Perfil de concentración de la demanda bioquímica nitrogenada de oxígeno en función al tiempo y la distancia

(a): Concentración de DBON en función al tiempo para cada posición longitudinal, (b): Concentración de DBON en función a la distancia para cada tiempo



(a)



(b)

La Figura 10 ha sido obtenida a partir de los datos de la Tabla 10; en (a) se observa la concentración de DBO nitrogenada en función al tiempo considerando la distancia como parámetro y en (b) se observa la concentración de DBO nitrogenada en función a la distancia para cada tiempo como parámetro y. A largo plazo se observa que la concentración en cada tramo se estabiliza en un determinado valor, haciendo que el cuerpo receptor no pueda auto depurarse.

**Tabla 11: Concentración de la sustancia inorgánica en función a la distancia y el tiempo de dispersión.**

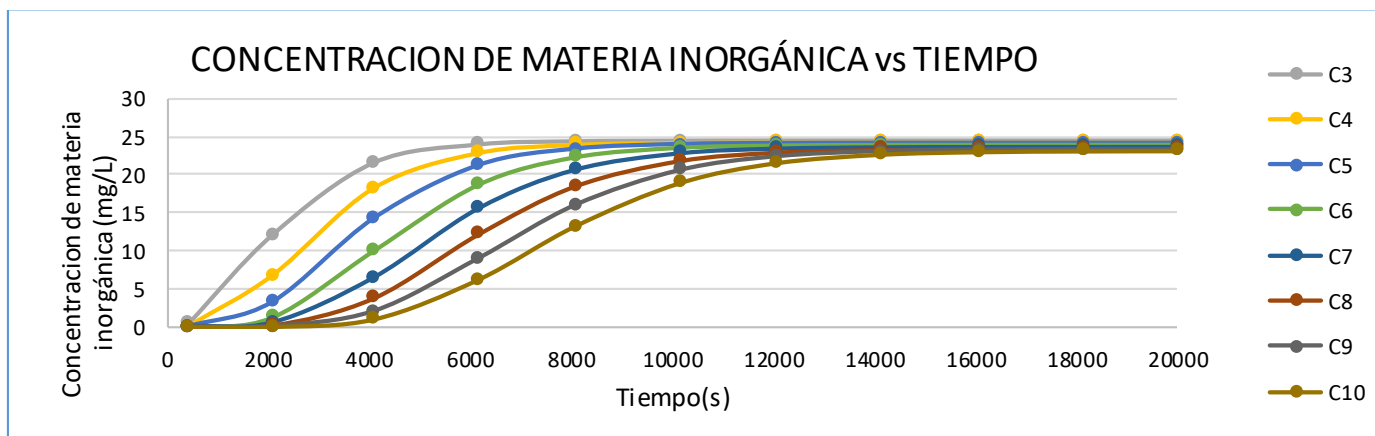
CONCENTRACION DE MATERIA INORGANICA - PERMANENTE											
TIEMPO	t(s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
T0	402.0998	10.13064	2.424845	0.4056744	0.0519087	0.0053666	0.000465	3.47E-05	2.27E-06	1.32E-07	6.93E-09
T1	2066.908	22.90616	18.12949	12.04995	6.735226	3.20686	1.320778	0.4774204	0.1534043	0.0443008	0.0117077
T2	4075.853	24.60177	23.59664	21.51786	18.2387	14.15852	9.998364	6.415996	3.749857	2.00427	0.9962133
T3	6144.623	24.77836	24.46301	23.89463	22.84397	21.10334	18.61052	15.51884	12.16024	8.926426	6.20278
T4	8064.623	24.79818	24.58151	24.31252	23.913	23.2597	22.20714	20.638	18.52077	15.94721	13.22575
T5	1.01E+04	24.80119	24.60149	24.39409	24.16118	23.86567	23.44454	22.81045	21.86662	20.53859	18.89687
T6	1.21E+04	24.80158	24.60431	24.40682	24.20509	23.98924	23.73892	23.41849	22.97482	22.344	21.51994
T7	1.41E+04	24.80165	24.60481	24.40924	24.21417	24.0175	23.81423	23.59403	23.33824	23.01899	22.62721
T8	1.61E+04	24.80166	24.60488	24.40961	24.21568	24.0226	23.82913	23.63239	23.42651	23.20167	22.95751
T9	1.81E+04	24.80166	24.6049	24.40969	24.21598	24.02369	23.83254	23.64187	23.4502	23.25504	23.06139
T10	2.00E+04	24.80166	24.6049	24.4097	24.21603	24.02388	23.83316	23.6437	23.45511	23.26689	23.08589
	DISTANCIA	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600

Fuente: Elaboración propia a partir de la ejecución del programa Polymath

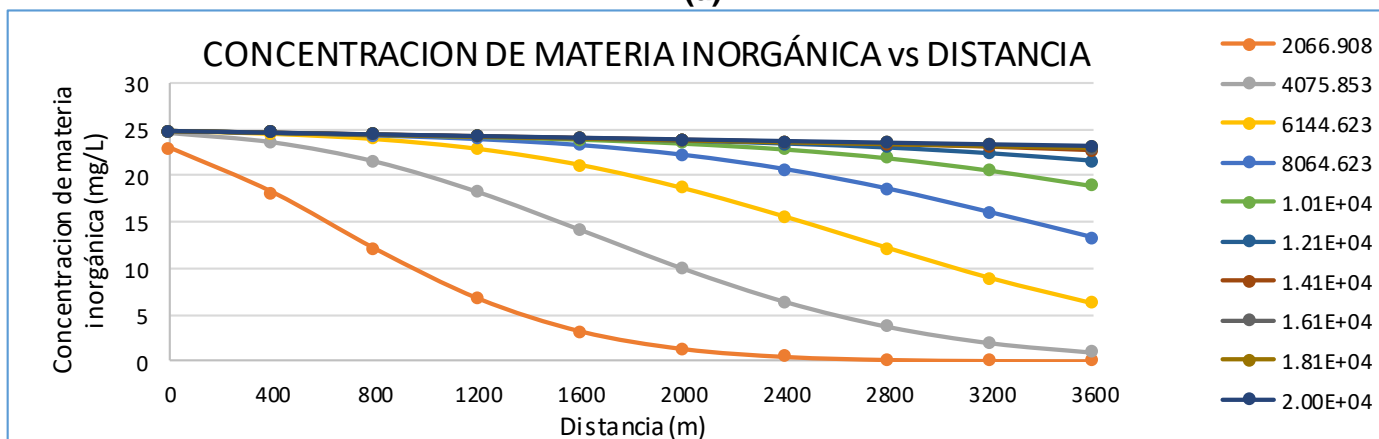
La Tabla 11 muestra los datos de concentración de materia inorgánica en función al tiempo para cada longitud. Se observa una distribución de concentración del contaminante, cuyo valor se va incrementando constantemente, debido al ingreso permanente de materia inorgánica proveniente de una fuente.

Figura 11: Perfil de concentración del material inorgánico en función al tiempo y la distancia (a): Concentración de materia inorgánico en función al tiempo para cada posición longitudinal, (b): Concentración de materia inorgánica en función a la distancia para cada tiempo,

La Figura 11 ha sido obtenida a partir de los datos de la Tabla 11; en (a) se observa la concentración de materia inorgánica función al tiempo considerando la distancia como parámetro, y en (b) se observa la concentración de materia inorgánica para cada tiempo como parámetro y. A largo plazo se observa que la concentración en cada tramo se estabiliza en un determinado valor, haciendo que el cuerpo receptor no pueda auto depurarse.



(a)



(b)

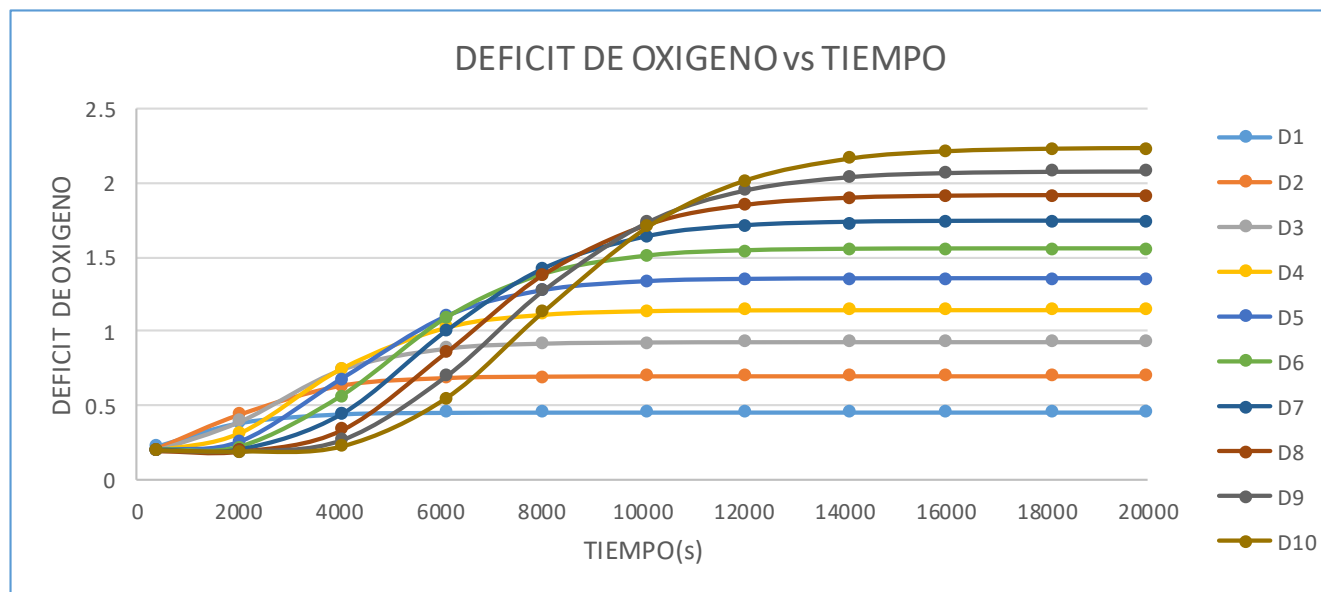
**Tabla 12: Déficit de oxígeno en función a la distancia y el tiempo de dispersión.**

CONCENTRACION DEFICIT INICIAL DE OXIGENO - PERMANENTE											
TIEMPO	t(s)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
T0	402.0998	0.2236121	0.2065814	0.1997547	0.1983622	0.198164	0.1981421	1.98E-01	1.98E-01	1.98E-01	1.98E-01
T1	2066.908	0.3840435	0.4405639	0.3975935	0.3210742	0.2574689	0.2195235	0.2014305	0.1941823	0.1916694	0.1909024
T2	4075.853	0.4427366	0.6347621	0.7437697	0.7542527	0.6814542	0.5634102	0.4404281	0.3390566	0.2683994	0.2258812
T3	6144.623	0.4530433	0.6856575	0.8845516	1.029569	1.100709	1.088466	1.000678	0.8611	0.7009328	0.5523846
T4	8064.623	0.4546323	0.6951803	0.9182278	1.116002	1.275687	1.381428	1.419278	1.383195	1.279299	1.132743
T5	1.01E+04	0.4549312	0.6971656	0.9263444	1.140746	1.336234	1.505357	1.637393	1.719981	1.742641	1.706419
T6	1.21E+04	0.4549778	0.697497	0.927842	1.145915	1.350793	1.540081	1.709203	1.851025	1.956407	2.017369
T7	1.41E+04	0.4549868	0.6975637	0.9281642	1.147126	1.354567	1.550148	1.732689	1.899696	2.046892	2.165933
T8	1.61E+04	0.4549883	0.6975747	0.9282201	1.147351	1.355326	1.552362	1.738391	1.912822	2.074074	2.215105
T9	1.81E+04	0.4549885	0.6975769	0.9282317	1.1474	1.355502	1.552913	1.739924	1.916654	2.082707	2.231916
T10	2.00E+04	0.4549886	0.6975773	0.9282336	1.147408	1.355534	1.55302	1.740242	1.917506	2.084768	2.236177
	DISTANCIA	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600

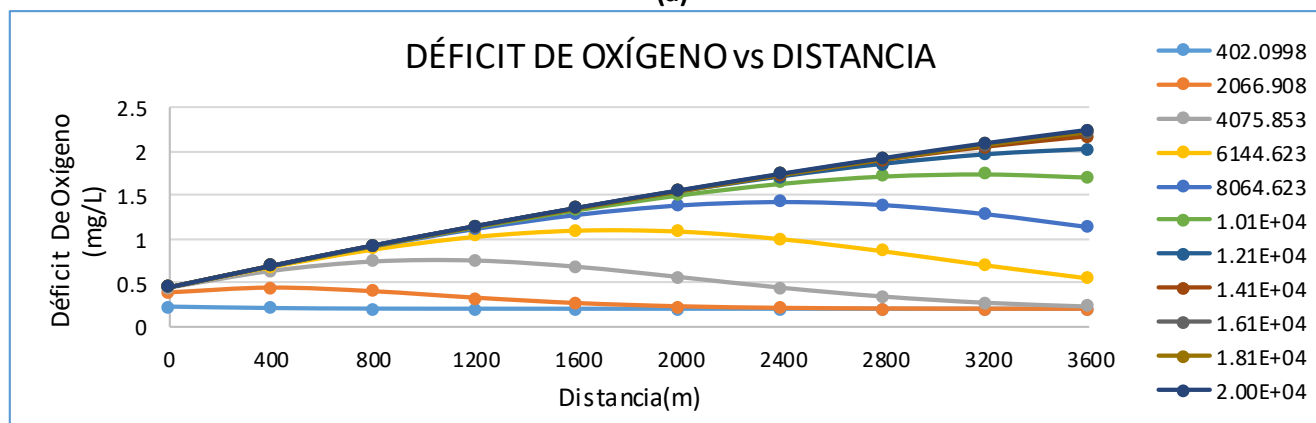
Fuente: Elaboración propia a partir de la ejecución del programa Polymath

La Tabla 12 muestra los datos de déficit de oxígeno carbonácea en función al tiempo para cada longitud. Se observa una distribución de déficit, cuyo valor se va incrementando constantemente, debido al ingreso permanente de materia orgánica carbonácea proveniente de una fuente.

Figura 12: Perfil de déficit de oxígeno en función al tiempo y la distancia (a): Déficit de oxígeno en función al tiempo para cada posición longitudinal, (b): Déficit de oxígeno en función a la distancia para cada tiempo.



(a)



(b)



La Figura 12 ha sido obtenida a partir de los datos de la Tabla 12; en (a) se observa el déficit en función al tiempo considerando la distancia como parámetro, y en (b) se observa el déficit en función a la distancia para cada tiempo como parámetro. A largo plazo se observa que el déficit en cada tramo se estabiliza en un determinado valor, haciendo que el cuerpo receptor no pueda auto depurarse.

## **V. DISCUSIÓN**





Mediante la simplificación de la ecuación general de conservación de materia es posible derivar la ecuación básica de Streeter-Phelps, cuyo modelo es usado tradicionalmente para estimar la calidad del agua en términos de contenido de carga orgánica carbonácea y nitrogenada, carga inorgánica y oxígeno disuelto.

Las características hidrodinámicas del cuerpo de agua receptor responsable es en gran medida de la tasa de desoxigenación del cuerpo de agua. Un cuerpo de agua con una gran turbulencia se oxigena más rápidamente debido al mayor contacto del agua en la interfase líquido gas. A pesar de que el modelo básico de Streeter-Phelps es tradicionalmente el modelo más usado para predecir la calidad del agua, han surgido una serie de modelos basados en los procesos de advección difusión-reacción (ADR), aplicable a situaciones particulares; es más; es posible generar modelos aún más específicos en base a las características del cuerpo de agua receptor y al medio por donde se desplaza.

Respecto a las constantes de remoción de carga orgánica y reoxigenación, se ha publicado numerosas correlaciones, aplicable a diversas condiciones de flujo, debiendo tenerse bastante cuidado durante su aplicación. También respecto a los coeficientes de difusión, se dispone de numerosas correlaciones que permite aproximar al termino difusivo de la ecuación de conservación de materia; sin embargo, el método más preciso para determinar el coeficiente de difusión turbulenta antes indicado es el método experimental de momentos estadísticos, pero se requieren datos experimentales; sin embargo, en este trabajo se ha aplicado los modelos de correlación debido a su disponibilidad.

#### Contrastación de la hipótesis con estudios similares

Kumarasamy (2015), en su artículo: "Deoxygenation and Reaeration Coupled Hybrid Mixing Cells Based Pollutant Transport Model to Assess water Quality Status of River", analiza el modelo de Streeter-Phelps modificado, donde considera un modelo híbrido de flujo continuo y uno de dos sistemas semicontínuos. El sistema de ecuaciones diferenciales generado es resuelto usando un método analítico. Las curvas obtenidas

en el presente trabajo, considerando el modelo advección-reacción son bastante similares.

#### Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Los resultados del programa REOX1.pol desarrollado en este trabajo en base al modelo básico de Streeter-Phelps usando los procedimientos analítico y numérico son similares al obtenido por (Brenner et al. 2005, citado por Gomes y Motta, 2016). en el trabajo denominado: “Aplicaciones of mathematical software packages for modelling and Simulations in Environmental Engineering Educación”, donde se reporta las curvas de la demanda bioquímica de oxígeno, déficit de oxígeno, concentración de oxígeno, el tiempo crítico, el déficit crítico y el factor de depuración; no toma en cuenta la variación de la solubilidad respecto a la presión y al contenido de sal, como si se hace en este trabajo de investigación desarrollado.

Cárdenas (2016) desarrolla el modelamiento matemático de la calidad del agua considerando las demandas bioquímicas de oxígeno carbonosa y nitrogenada, además del déficit de oxígeno que está involucrado en los procesos de dispersión axial, ingreso de fuentes puntuales y procesos de respiración y fotosíntesis en régimen no estacionario. Dicho modelo fue interpretado y llevado al programa desarrollado.

Las Tablas 5, 6, 7 y 8 muestran los resultados de la ejecución del programa desarrollado para el caso de ingreso tipo pulso de la mezcla de contaminantes orgánico e inorgánico. Estas tablas son el resultado de la resolución de los balances de materia aplicado a cada uno de los componentes del proceso, es decir materia orgánica carbonácea y nitrogenada, materia inorgánica y déficit de oxígeno. A partir de estas tablas se ha elaborado las figuras 5,6,7 y 8 que representan las curvas de concentración vs tiempo a distancia constante y las curvas de concentración vs distancia a tiempo constante. Las curvas muestran un comportamiento gaussiano, característico de este tipo de fenómenos fisicoquímicos.

Las Tablas 9, 10, 11 y 12 muestran los resultados de la ejecución del programa desarrollado para el caso de ingreso permanente de la mezcla de contaminantes orgánico e inorgánico. Estas tablas son el resultado de la resolución de los balances



de materia aplicado a cada uno de los componentes del proceso, es decir materia orgánica carbonácea y nitrogenada, materia inorgánica y déficit de oxígeno. A partir de estas tablas se ha elaborado las figuras 9, 10, 11 y 12 que representan las curvas de concentración vs tiempo a distancia constante y las curvas de concentración vs distancia a tiempo constante. Las curvas muestran un comportamiento hiperbólico, característico de este tipo de fenómenos fisicoquímicos.

## **VI. CONCLUSIONES**



- Se ha logrado modelar el proceso de desoxigenación como consecuencia de la carga orgánica carbonácea y nitrogenada; así como la presencia de carga inorgánica. Dicho modelo es una ecuación modificada del modelo básico de Streeter-Phelps, donde se ha incorporado una serie de parámetros para completar el modelo. Luego se ha simulado una serie de eventos utilizando el programa desarrollado; y con la generación de múltiples datos, se ha presentado la ocurrencia de dos eventos específicos: uno con ingreso instantáneo y otro con ingreso permanente.
- Las características hidrodinámicas de un cuerpo de agua juegan un rol importante en el proceso de autodepuración. Este proceso depende principalmente del proceso de reoxigenación, cuyo valor se ve incrementado cuando el flujo es turbulento, torrentoso y de alta velocidad; el programa tiene la capacidad de considerar estos aspectos.
- El modelo matemático elaborado es un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales ordinarias aplicado a la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea, demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada, materia inorgánica y déficit de oxígeno; es la aplicación de la ley de conservación de materia difusional. Se considera los términos de dispersión como la advección (variación de la concentración debido al flujo), difusión (variación de la concentración debido a sus gradientes) y reacción (debido a los cambios químicos); en conjunto se denomina modelo ADR modificado, pues, además se incorporan cargas difusas de materia orgánica e inorgánica, así como aportes y consumo de oxígeno por fotosíntesis y respiración, respectivamente.
- La solución del modelo matemático, puede realizarse mediante los métodos de Lines, de diferencias finitas (explícitas, implícitas o Crack de Nicholson); en esta investigación hemos utilizado el primer método de Lines, que consiste en discretizar el segundo miembro de la ecuación diferencial parcial del modelo propuesto, con la cual se consigue transformar a un sistema de ecuaciones



diferenciales ordinarias.

- Se ha desarrollado un programa de cálculo usando la rutina de ecuaciones diferenciales ordinarias del software polymath, que permite desarrollar el programa de una manera relativamente sencilla; con este programa se puede simular una gran variedad de casos, realizando pequeñas modificaciones al programa desarrollado; es decir, nuestro programa denominado REOX1.pol tiene un gran potencial para simular una variedad de casos en régimen turbulento.

## **VII. RECOMENDACIONES**



- En la eventualidad que algún investigador desee realizar un trabajo experimental, nuestro programa desarrollado puede ser utilizado para predecir resultados a partir del conocimiento de algunos datos experimentales preliminares como régimen de flujo y caudal.
- Nuestro programa también puede ser utilizada por las empresas que realizan vertimientos de sustancias contaminantes para predecir los valores críticos de concentración de oxígeno que pueda poner en peligro algún ecosistema acuático en particular. Solo requerirá conocer los flujos del cuerpo receptor y el efluente y su concentración; esto permitirá obtener los parámetros críticos antes indicados.
- Se recomienda realizar el modelamiento de la calidad del agua porque es una herramienta que nos permite predecir, como se comportan las sustancias vertidas en el agua, mediante modelos matemáticos, así nos permita preservar la calidad del agua en el medio ambiente.
- En el mundo hay necesidad de proteger los recursos hídricos de los posibles impactos que genera el desarrollo urbano, industrial y agrícola. los modelos de calidad del agua son herramientas importantes para contribuir en el proceso de toma de decisiones y por lo tanto fortalecer el desarrollo sostenible.



## REFERENCIAS

- AMARILLA, R. Modelamiento matemático del contenido de oxígeno disuelto en el brazo aña cua, aguas abajo de la represa de Yacireta. Tesis de maestría en eco-hidrología, Universidad de Buenos Aires, Argentina. 2017.
- ALBERS, Michael J. *Quantitative data analysis - In the graduate curriculum. Journal of Technical Writing and Communication*, 2017, vol. 47, no 2, p. 215-233.
- ATHIRAH, Arifin, et al. *Assessment of household greywater discharge from village houses using Streeter–Phelps model in stream*. Desalination And Water Treatment, 2020, vol. 179, p. 8-18.
- BERGAMASCHI terciñi, João Rafael; MÉLLO júnior, arisvaldo vieira. Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê. RBRH, 2016, vol. 21, no 2, p. 338-346.
- BERNARDO, C.; CARBAJAL, Y CONTRERAS, V. Metodología de la investigación: Manual del estudiante. Perú: Universidad de San Martín de Porres, 2019.
- BRISO Retamales, Alejandro Eduardo. *Síntesis y caracterización de dióxido de manganeso y silicatos de calcio nano-estructurados con propiedades magnéticas a emplear como adsorbentes de contaminantes inorgánicos desde soluciones acuosas que simulan aguas ácidas de mina*. 2017.
- CABEZAS Mejia, Edison, et al. *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Universidad de las Fuerzas Armadas : ESPE, 2018. ISBN9789942765444.
- Cádiz, J. *Rigurosidad científica y principios orientadores para el evaluador/investigador*. 2016.
- CARBALLO Barcos, Miriam; GUELMES valdés, Esperanza. *Algunas consideraciones acerca de las variables en las investigaciones que se desarrollan en educación*. Revista Universidad y Sociedad, 2016, vol. 8, no 1, p. 140-150.
- CÁRDENAS Pestana, Jorge Alberto. *Propuesta y análisis de un modelo matemático para la determinación de la calidad del agua de aguas superficiales*. 2016. Tesis Doctoral. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.



CARRASCO Venegas, Luis. Modelamiento de los Fenómenos de Transporte Ed. Macro, Lima Perú, 2018. 725 pp.

ISBN9786123045579

CARRASCO Venegas, Luis, et al. *Simulación de los procesos de desoxigenación y reoxigenación en aguas contaminadas*. Revista Campus, 2020, vol. 25, no 30.

COSTA Barros Jessyca. *Aplicação da teoria Fuzzy no modelo de Streeter-Phelps para o cálculo do risco de contaminação das águas de rios, em função da temperatura*. 2016.

COSTA Chaves, Larissa, et al. *Análise da autodepuração no riacho caraibeirinhas a través do modelo matemático de Streeter-Phelps*. 2017.

CLAROS Guerrero, Edith Meryluz, et al. *Modelación de la dispersión de contaminantes del agua de la cuenca del Rio Huaura*—2017. 2018

CHINH, Le Van, et al. *Estimation of Water Environment Capacity in the Cau River Basin, Vietnam using the Streeter–Phelps Model*. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2017, vol. 62, p. 163-169.

FERIA Díaz, Jhon J.; NÁDER Salgado, Daniela; MEZA Pérez, Sindy J. *Deoxygenation and re-aeration rates of the Sinu river*. *Ingeniería y Desarrollo*, 2017, vol. 35, no 1, p. 8-17.

FERNANDEZ Bedoya, Victor H. Tipos de justificación en la investigación científica. *Espíritu Emprendedor TES*, 2020, vol. 4, no 3, p. 65-76.

GOMES zuin, Vânia; MOTTA borgonove, Carolina. Environmental Education In Distance Learning In Environmental Engineering At Federal University Of São Carlos, Brazil: Potentialities And Limitations Towards A Critical Techno-Scientific Education. *Brazilian Journal Of Science And Technology*, 2016, Vol. 3, No 1, P. 1-14.

HERRERA Vega, Héctor Alexis. *Contaminación del agua superficial por un ingenio azucarero y su impacto en el medio ambiente en Andahuasi* 2017. 2018.

HIGASHINO, Makoto; STEFAN, Heinz G. Oxygen uptake prediction in rivers and streams: a stochastic approach. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 203, p. 200-207.

HIDAYAH Euis, Nurul; SANI, Dellentya; CAHYONUGROHO, Okik Hendriyanto. Research Article Assessment of Surabaya River (Karang Pilang-Gunung Sari Segment) Water Quality by Streeter-Phelps Model.2020.

KUMARASAMY, M. V. Deoxygenation and Reaeration Coupled hybridMixing cells Based Pollutant Transport Model to Assess water Quality Status of a River. *International journal of environmental research*, 2015, vol. 9, no 1, p. 341-350.

LARIOS, Fernando; GONZÁLEZ, Carlos; MORALES, Yennyfer. *Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú*. Saber y hacer, 2016, vol. 2, no 2, p. 8-25.

LEI, Hongjun, et al. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and Mazzei air injector in soil-less irrigation systems. *Irrigation Science*, 2016, vol. 34, no 6, p. 421-430.

LOUCKS, Daniel P.; VAN BEEK, Eelco. Water quality modeling and prediction. En *Water Resource Systems Planning and Management*. Springer, Cham, 2017. p. 417-467.

LÓPEZ Jiménez, Petra Amparo. La modelación de la dispersión de contaminantes en medios receptores. 2016

MASCHAL Tarekegn, Mekonnen; AMSALU Zomaneh, Truye. Causes and impacts of shankila river water pollution in Addis Ababa, Ethiopia. *Environ Risk Assess Remediat*. 2018; 2 (4): 21, 2018, vol. 30.

MUÑOZ, Marcelo; ALDÁS, Maria. *Sistemas de depuración de aguas residuales*. EPN, Quito, Ecuador, 2017.

MINAGRI. Ministerio De Agricultura Y Riego. [Fecha de la consulta: 04 de octubre de 2018]



MENÉNDEZ Gutiérrez, Carlos; DUEÑAS Moreno, Jaime. *Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional*. Ingeniería hidráulica y ambiental, 2018, vol. 39, no 3, p. 97-107.

MATOVELLE, Carlos. *Modelo matemático de calidad de agua aplicado en la microcuenca del río Tabacay* *Water quality mathematical model applied in the watershed of the river Tabacay*. Revista Killkana Técnica. Vol, 2017, vol. 1, no1.

Orduz, L. Determinación y comparación de la tasa de reaeración de los ríos molinos, torca, arzobispo y de la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá mediante la aplicación de ecuaciones empíricas. Facultad de Ingeniería Ambiental- Universidad Santo Tomas, Colombia. 2016.

OTERO Ortega, Alfredo. Enfoques de investigación. *Extraído de [https://www.researchgate.net/profile/alfredo\\_otero\\_ortega/publication/326905435\\_enfoques\\_de\\_investigacion\\_tabla\\_de\\_contenido\\_contenido/links/5b6b7f9992851ca650526dfd/enfoques-delInvestigacion-Tabla-DeContenido-Contenido.pdf](https://www.researchgate.net/profile/alfredo_otero_ortega/publication/326905435_enfoques_de_investigacion_tabla_de_contenido_contenido/links/5b6b7f9992851ca650526dfd/enfoques-delInvestigacion-Tabla-DeContenido-Contenido.pdf)* el, 2018, vol. 14.

PÉREZ García, Roxana. *Estudio del transporte hidrodinámico del nitrato como contaminante de los ríos*. 2017. Tesis Doctoral. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

PRADANA Hendra, Andiananta, et al. *Analysis of deoxygenation and reoxygenation rate in the Indonesia River (a case study: Bedadung River East Java)*. *En IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. p. 012006.

QUIÑONES Huatangari, Lenin, et al. Empleo del Modelo Streeter-Phelps para estimar el oxígeno disuelto del Río Utcubamba. *Ecuadorian Science Journal*, 2020, vol. 4, no 2, p. 12-16.

QUISPE Prado, W, et al. *Dispersión de contaminantes en cursos de agua: estudios en el río Chumbao*, Perú. 2016.

RAMOS Ramírez, Luis ángel, et al. *Simulation of CrIII dispersion in the High Bogotá River Basin using the WASP model*. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 2020, no 97, p. 30-40.

RIAÑO Valle, Félix. *Antecedentes de la conocida ecuación de Bernoulli*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2020, vol. 41, no 1, p. 71-84.

ROBBINS, Stephen P.; COULTER, Mary. Management 13E. Pearson India, 2017.

RODRÍGUEZ Amaya, Jose. *Evaluacion De Impacto Ambiental En El Recurso Hidrico, Debido A La Produccion De La Pasta Base De Cocaína En Un Corregimiento Del Municipio De San Calixto Ns*. 2019. Tesis Doctoral.

SHARMA, Deepshikha; KANSAL, Arun; PELLETIER, Greg. Water quality modeling for urban reach of Yamuna river, India (1999–2009), using QUAL2Kw. *Applied Water Science*, 2017, vol. 7, no 3, p. 1535-1559.

The Word Bank (2016) [http://http://data.worldbank.org/products/wdi](http://data.worldbank.org/products/wdi)

TREERANUT, Srisunont; CHAYARAT, Srisunont; SITTICHA, Tantanasarit. Using STELLA Software for Water Quality Modeling. 2016.

TACILLO Yauli, Elvis Fernando. *Metodología de la investigación científica*. 2016.

VILA Luján, Ruth Vitman. Toxicidad de residuos químicos de la elaboración de pasta básica de cocaína sobre renacuajos de *Rhinella spinulosa*. Ayacucho, 2015. 2017.

VILLASÍS Keever, Miguel Ángel; MIRANDA Novales, María Guadalupe. El protocolo de investigación IV: las variables de estudio. *Revista Alergia México*, 2016, vol. 63, no 3, p. 303-310.

## **ANEXOS**

## Anexo 01: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

TESIS: Modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río								
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	Variables	Definición conceptual	Definición operacional	dimensión	indicadores	Escala de Medición
<b>General</b>	<b>General</b>	<b>General</b>						
¿Cómo se podrá modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río?	Modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río.	El uso de los principios de conservación de materia, junto con las herramientas matemáticas y la ayuda de un software permitirá modelar y simular la dispersión de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río.	Y = Modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos	Dispersión es el proceso de atenuación de un contaminante como resultado del transporte advectivo, transporte difusivo y, fenómenos físico-químico y biológicos, según Carrasco (2018).	Es el proceso de evaluación de la variación temporal y espacial de los contaminantes en un tramo determinado de un río (Carrasco, 2018).	Longitud y tiempo a la cual se alcanza una concentración similar a los niveles antes del vertimiento de la mezcla de contaminantes	Concentración espacial y temporal (ppm) de los contaminantes	Tramo de 3600m en el río
<b>Específicos</b>	<b>Específicos</b>	<b>Específicos</b>						
¿Cuáles son las características hidrodinámicas y parámetros de flujo considerados para el modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río?	Determinar las características hidrodinámicas y los parámetros de flujo del río que permita modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos.	El conocimiento de las características hidrodinámicas y los parámetros de flujo permiten la simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos	X1= Características hidrodinámicas y parámetros de flujo del río.	La hidrodinámica es la parte de la mecánica de los medios continuos en la que se estudia el movimiento de fluidos incompresibles y la interacción de estos con el medio. El transporte hidrodinámico actúa para desplazar contaminante de la locación donde son vertidos. Según Pérez (2017).	La hidrodinámica es fundamental para hallar el caudal, la velocidad media, la profundidad media, la velocidad cortante entre otros; en consecuencia, su aplicación dependerá de la caracterización previa del flujo de agua respectivo. Según Carrasco (2020).	Tipo de flujo Relación entre fuerza viscosa y la fuerza de la gravedad	Numero de Reynoldsmáximo	Nro. Reynolds mayor a 4000.
¿Cuál debe ser el modelo matemático a aplicar al flujo de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos	Proponer el modelo matemático aplicable al proceso de dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos	El modelo matemático propuesto es aplicable al proceso de dispersión de la mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos	X2= Modelo matemático aplicable al flujo de la dispersión de la mezcla de contaminantes	Un modelo matemático es un conjunto de conceptos y ecuaciones que permiten acercarse a la realidad de un fenómeno, aunque los modelos son conceptos con fundamentación teórica la necesidad de herramientas	El modelo matemático para la dispersión considera la advección (proceso de transporte por flujo), difusión (proceso de transporte por variación de concentración) y reacción química (consumo de DBO e	Análisis de los modelos	Estabilidad del modelo	Los valores de concentración en función al tiempo y distancia sean menores que las concentraciones iniciales.



	inorgánicos en un río			computacionales ha permitido la creación de formulaciones pre-definidas sobre diferentes casos específicos según Paredes (2004), citado por Matovelle (2017).	incremento de déficit de oxígeno).			
¿Cuáles son los métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto?	Determinar los métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto.	Los métodos de solución aplicables al modelo de Streeter y Phelps modificado, son los métodos de líneas y de diferencias finitas	X3= Métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto.	El modelo unidimensional de Streeter y Phelps modificado, en el cual se ha incorporado sustancias orgánicas e inorgánicas, considera la aplicación del balance de masa en régimen no estacionario para los contaminantes estudiados (Matovelle, 2017).	El modelo Streeter y Phelps modificado aplicado a la dispersión de contaminantes que considera el balance de masa de la carga orgánica carbonácea, nitrogenada; así como los compuestos inorgánicos y el oxígeno disuelto. (Romero, 2013 citado por Matovelle, 2017).	Estabilidad de los valores reportados	Topología de las curvas de dispersión	La forma de las curvas reportadas, deben ser similares a las reportadas en la literatura científica
¿Cuál es el software que permite resolver el modelo resultante de proceso de dispersión?	Utilizar un software apropiado para desarrollar un programa que resuelva el modelo de dispersión propuesto.	El programa desarrollado permite simular adecuadamente diversas condiciones similares a las propuestas en esta investigación.	X4= programa que resuelva el modelo para condiciones propuestas.	El software Polymath se caracteriza por resolver ecuaciones diferenciales ordinarias utilizando algoritmos explícitos e implícitos.	El software Polymath permite resolver las 40 ecuaciones del modelo utilizando el método explícito de líneas.	Facilidad de uso del programa	Tiempo empleado para la programación	Aproximadamente 15 días hombre de trabajo.



**Anexo 02: MATRIZ DE CONSISTENCIA**

<b>TESIS: Modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río</b>						
<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPOTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>		<b>METODOLOGIA</b>	<b>POBLACION, MUESTRA Y MUESTREO</b>
<b>PROBLEMA GENERAL</b>  ¿Cómo se podrá modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río?  <b>PROBLEMAS ESPECIFICOS</b>  a. ¿Cuáles son las características hidrodinámicas y los parámetros de flujo considerados para el modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río?  b. ¿Cuál debe ser el modelo matemático a aplicar	<b>OBJETIVO GENERAL</b>  Modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río.  <b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>  a. Determinar las características hidrodinámicas y los parámetros de flujo del río que permita modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos.  b. Proponer el modelo matemático aplicable al proceso de dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos.	<b>HIPOTESIS GENERAL</b>  El uso de los principios de conservación de materia, junto con las herramientas matemáticas y la ayuda de un software permitirá modelar y simular la dispersión de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río.  <b>HIPOTESIS ESPECIFICAS</b>  a. El conocimiento de las características hidrodinámicas y los parámetros de flujo permiten la simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos.  b. El modelo matemático propuesto es aplicable al proceso de dispersión de la mezcla de	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>  <b>Y:</b> Modelamiento y simulación de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos.  <b>DIMENSION</b> Longitud y tiempo a la cual se alcanza una concentración similar a los niveles antes del vertimiento de la mezcla de contaminantes.  <b>INDICADOR</b> Concentración espacial y temporal (ppm) de los contaminantes.	<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>  <b>X1:</b> Características hidrodinámicas y parámetros de flujo del río.  <b>DIMENSION</b> Tipo de flujo: Relación entre fuerza viscosa y la fuerza de la gravedad.  <b>INDICADOR</b> Numero de Reynolds máximo.  <b>X2:</b> Modelo matemático aplicable al flujo de la dispersión de la mezcla de contaminantes.  <b>DIMENSION</b> Análisis de los modelos.	<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACION</b>  Cuasi experimental, explicativa y predictiva.  <b>NIVEL DE LA INVESTIGACION</b> Correlacional.  <b>METODO DE LA INVESTIGACION</b> Científico  <b>ENFOQUE</b> Mixto (cualitativo y cuantitativo)	<b>POBLACION</b>  Cuerpos de agua de flujo superficial.  <b>MUESTRA</b> Ríos con régimen de flujo turbulento  <b>MUESTREO</b>  No aplica



<p>al flujo de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos?</p> <p>c. ¿Cuáles son los métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto?</p> <p>d. ¿Cuál es el software que permite resolver el modelo resultante de proceso de dispersión?</p>	<p>inorgánicos en un río.</p> <p>c. Determinar los métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto.</p> <p>d. Utilizar un software apropiado para desarrollar un programa que resuelva el modelo de dispersión propuesto.</p>	<p>contaminantes orgánicos e inorgánicos.</p> <p>c. Los métodos de solución aplicables al modelo de Streeter y Phelps modificado, son los métodos de líneas y de diferencias finitas</p> <p>d. El programa desarrollado permite simular adecuadamente diversas condiciones similares a las propuestas en esta investigación.</p>		<p><b>INDICADOR</b> Estabilidad del modelo.</p> <p><b>X3:</b> Métodos de solución aplicables al modelo de dispersión propuesto.</p> <p><b>DIMENSION</b> Estabilidad de los valores reportados.</p> <p><b>INDICADOR</b> Topología de las curvas de dispersión.</p> <p><b>X4:</b> Programa que resuelva el modelo para las condiciones propuestas.</p> <p><b>DIMENSION</b> Facilidad de uso del programa</p> <p><b>INDICADOR</b> Tiempo empleado para la programación.</p>		
---	--	--	--	--	--	--

**ANEXO 3: PARAMETROS HIDRODINÁMICOS**

nomenclatura	parámetro	Unidades
<b>U</b>	Velocidad del fluido	m/s <sup>2</sup>
<b>H</b>	Altura de la corriente de flujo	m
<b>W</b>	Ancho del río	m
<b>UA</b>	Velocidad cortante	Cm/s
<b>g</b>	gravedad	m/s <sup>2</sup>
<b>SE</b>	Pendiente	% y grados
<b>DX</b>	Incremento longitudinal	m
<b>RE</b>	Numero de Reynolds	Adimensional
<b>Dens</b>	Densidad	g/cm <sup>3</sup>
<b>visc</b>	Viscosidad	m <sup>2</sup> /s
<b>Deq</b>	Densidad equivalente	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Af</b>	Área de flujo	m <sup>3</sup> /s
<b>Pm</b>	Perímetro mojado	m
<b>t</b>	Temperatura	°C

**ANEXO 4. PROGRAMA REOX 1.POL DE DISPERSION DE CONTAMINANTES ORGANICOS E INORGANICOS EN LA CUENCA DE UN RIO****MODELO PARA CONTAMINANTE POR ACCIDENTE(PULSO)**

# Balance de materia de carga organica carbonacea

$$d(L1)/d(t) = -U * (L1 - L0) / DX + E * (L2 - 2 * L1 + L0) / DX^2 - kr * L1 + WC1$$

$$d(L2)/d(t) = -U * (L2 - L1) / DX + E * (L3 - 2 * L2 + L1) / DX^2 - kr * L2 + WC2$$

$$d(L3)/d(t) = -U * (L3 - L2) / DX + E * (L4 - 2 * L3 + L2) / DX^2 - kr * L3 + WC3$$

$$d(L4)/d(t) = -U * (L4 - L3) / DX + E * (L5 - 2 * L4 + L3) / DX^2 - kr * L4 + WC4$$

$$d(L5)/d(t) = -U * (L5 - L4) / DX + E * (L6 - 2 * L5 + L4) / DX^2 - kr * L5 + WC5$$

$$d(L6)/d(t) = -U * (L6 - L5) / DX + E * (L7 - 2 * L6 + L5) / DX^2 - kr * L6 + WC6$$

$$d(L7)/d(t) = -U * (L7 - L6) / DX + E * (L8 - 2 * L7 + L6) / DX^2 - kr * L7 + WC7$$

$$d(L8)/d(t) = -U * (L8 - L7) / DX + E * (L9 - 2 * L8 + L7) / DX^2 - kr * L8 + WC8$$

$$d(L9)/d(t) = -U * (L9 - L8) / DX + E * (L10 - 2 * L9 + L8) / DX^2 - kr * L9 + WC9$$

$$d(L10)/d(t) = -U * (L10 - L9) / DX + E * (L11 - 2 * L10 + L9) / DX^2 - kr * L10 + WC10$$

# Balance de materia de carga organica nitrogenada

$$d(N1)/d(t) = -U * (N1 - N0) / DX + E * (N2 - 2 * N1 + N0) / DX^2 - km * N1 + WN1$$

$$d(N2)/d(t) = -U * (N2 - N1) / DX + E * (N3 - 2 * N2 + N1) / DX^2 - km * N2 + WN2$$

$$d(N3)/d(t) = -U * (N3 - N2) / DX + E * (N4 - 2 * N3 + N2) / DX^2 - km * N3 + WN3$$

$$d(N4)/d(t) = -U * (N4 - N3) / DX + E * (N5 - 2 * N4 + N3) / DX^2 - km * N4 + WN4$$

$$d(N5)/d(t) = -U * (N5 - N4) / DX + E * (N6 - 2 * N5 + N4) / DX^2 - km * N5 + WN5$$

$$d(N6)/d(t) = -U * (N6 - N5) / DX + E * (N7 - 2 * N6 + N5) / DX^2 - km * N6 + WN6$$

$$d(N7)/d(t) = -U * (N7 - N6) / DX + E * (N8 - 2 * N7 + N6) / DX^2 - km * N7 + WN7$$

$$d(N8)/d(t) = -U * (N8 - N7) / DX + E * (N9 - 2 * N8 + N7) / DX^2 - km * N8 + WN8$$

$$d(N9)/d(t) = -U * (N9 - N8) / DX + E * (N10 - 2 * N9 + N8) / DX^2 - km * N9 + WN9$$

$$d(N10)/d(t) = -U * (N10 - N9) / DX + E * (N11 - 2 * N10 + N9) / DX^2 - km * N10 + WN10$$

# Balance de materia del material inorganico

$$d(C1)/d(t) = -U * (C1 - C0) / DX + E * (C2 - 2 * C1 + C0) / DX^2 - k * C1$$

$$d(C2)/d(t) = -U * (C2 - C1) / DX + E * (C3 - 2 * C2 + C1) / DX^2 - k * C2$$

$$d(C3)/d(t) = -U * (C3 - C2) / DX + E * (C4 - 2 * C3 + C2) / DX^2 - k * C3$$



$$\begin{aligned}d(C4)/d(t) &= -U * (C4 - C3) / DX + E * (C5 - 2 * C4 + C3) / DX^2 - k * C4 \\d(C5)/d(t) &= -U * (C5 - C4) / DX + E * (C6 - 2 * C5 + C4) / DX^2 - k * C5 \\d(C6)/d(t) &= -U * (C6 - C5) / DX + E * (C7 - 2 * C6 + C5) / DX^2 - k * C6 \\d(C7)/d(t) &= -U * (C7 - C6) / DX + E * (C8 - 2 * C7 + C6) / DX^2 - k * C7 \\d(C8)/d(t) &= -U * (C8 - C7) / DX + E * (C9 - 2 * C8 + C7) / DX^2 - k * C8 \\d(C9)/d(t) &= -U * (C9 - C8) / DX + E * (C10 - 2 * C9 + C8) / DX^2 - k * C9 \\d(C10)/d(t) &= -U * (C10 - C9) / DX + E * (C11 - 2 * C10 + C9) / DX^2 - k * C10\end{aligned}$$

# Balance de materia de deficit de oxigeno

$$\begin{aligned}d(D1)/d(t) &= -U * (D1 - D0) / DX + E * (D2 - 2 * D1 + D0) / DX^2 - ka * D1 + kd * L1 + kn * N1 + SW21 \\d(D2)/d(t) &= -U * (D2 - D1) / DX + E * (D3 - 2 * D2 + D1) / DX^2 - ka * D2 + kd * L2 + kn * N2 + SW22 \\d(D3)/d(t) &= -U * (D3 - D2) / DX + E * (D4 - 2 * D3 + D2) / DX^2 - ka * D3 + kd * L3 + kn * N3 + SW23 \\d(D4)/d(t) &= -U * (D4 - D3) / DX + E * (D5 - 2 * D4 + D3) / DX^2 - ka * D4 + kd * L4 + kn * N4 + SW24 \\d(D5)/d(t) &= -U * (D5 - D4) / DX + E * (D6 - 2 * D5 + D4) / DX^2 - ka * D5 + kd * L5 + kn * N5 + SW25 \\d(D6)/d(t) &= -U * (D6 - D5) / DX + E * (D7 - 2 * D6 + D5) / DX^2 - ka * D6 + kd * L6 + kn * N6 + SW26 \\d(D7)/d(t) &= -U * (D7 - D6) / DX + E * (D8 - 2 * D7 + D6) / DX^2 - ka * D7 + kd * L7 + kn * N7 + SW27 \\d(D8)/d(t) &= -U * (D8 - D7) / DX + E * (D9 - 2 * D8 + D7) / DX^2 - ka * D8 + kd * L8 + kn * N8 + SW28 \\d(D9)/d(t) &= -U * (D9 - D8) / DX + E * (D10 - 2 * D9 + D8) / DX^2 - ka * D9 + kd * L9 + kn * N9 + SW29 \\d(D10)/d(t) &= -U * (D10 - D9) / DX + E * (D11 - 2 * D10 + D9) / DX^2 - ka * D10 + kd * L10 + kn * N10 \\&+ SW210\end{aligned}$$

L1(0) = 40 # 40 # Carga organica carbonacea inicial

L2(0) = 0

L3(0) = 0

L4(0) = 0

L5(0) = 0

L6(0) = 0

L7(0) = 0

L8(0) = 0

L9(0) = 0

L10(0) = 0

N1(0) = 20 # 20 # Carga organica nitrogenada inicial

N2(0) = 0

N3(0) = 0

N4(0) = 0

N5(0) = 0

N6(0) = 0

N7(0) = 0

N8(0) = 0

N9(0) = 0

N10(0) = 0

# Deficit inicial de oxigeno a lo largo del flujo

D1(0) = 0.2

D2(0) = 0.2

D3(0) = 0.2

D4(0) = 0.2

D5(0) = 0.2

D6(0) = 0.2

D7(0) = 0.2

D8(0) = 0.2

D9(0) = 0.2

D10(0) = 0.2

## # Concentracion de materia inorganica

$$C1(0) = 25 \# 25$$

$$C2(0) = 0$$

$$C3(0) = 0$$

$$C4(0) = 0$$

$$C5(0) = 0$$

$$C6(0) = 0$$

$$C7(0) = 0$$

$$C8(0) = 0$$

$$C9(0) = 0$$

$$C10(0) = 0$$

## # Concentracion instantanea de oxigeno

$$C1S = Cs - D1$$

$$C2S = Cs - D2$$

$$C3S = Cs - D3$$

$$C4S = Cs - D4$$

$$C5S = Cs - D5$$

$$C6S = Cs - D6$$

$$C7S = Cs - D7$$

$$C8S = Cs - D8$$

$$C9S = Cs - D9$$

$$C10S = Cs - D10$$

## # Carga organica carbonacea difusa

$$WC1 = 0.00$$

$$WC2 = 0.00$$

$$WC3 = 0.00$$

$$WC4 = 0.00$$

$$WC5 = 0.00$$

$$WC6 = 0.00$$

$$WC7 = 0.000$$

$$WC8 = 0.00$$

$$WC9 = 0.00$$

$$WC10 = 0.00$$

## # Carga organica nitrogenada difusa

$$WN1 = 0.00$$

$$WN2 = 0.00$$

$$WN3 = 0.00$$

$$WN4 = 0.00$$

$$WN5 = 0.00$$

$$WN6 = 0.00$$

$$WN7 = 0.00$$

$$WN8 = 0.00$$

$$WN9 = 0.00$$

$$WN10 = 0.00$$

## # Fuentes y sumideros (fotosintesis y respiracion)

$$SW21 = 0$$

$$SW22 = 0.000$$

$$SW23 = 0.00$$

$$SW24 = 0.00$$

$$SW25 = 0$$

$$SW26 = 0$$



SW27 = 0  
SW28 = 0.000  
SW29 = 0.00  
SW210 = 0.000

# Condición inicial

L0 = 0 # 0 # 0 # Carga organica carbonacea aguas arriba  
N0 = 0 # 0 # Carga organica nitrogenada carbonacea aguas arriba  
D0 = 0.2 # Deficit inicial de oxigeno disuelto  
C0 = 0 # 0

# Condiciones de frontera

C11 = C10  
L11 = L10  
D11 = D10  
N11 = N10

# Parametros de flujo

U = 0.5 # Velocidad del fluido (m/s)  
H = 1 # altura de la corriente de flujo  
W = 5 # ancho del rio  
UA = (SE \* g \* H) ^ 0.5  
g = 9.81  
SE = 1 / 100 # Pendiente  
DX = 400 # Incremento longitudinal

Re=dens\*U\*Deq/Visc  
dens=1000 #densidad  
Visc=1E-3 # viscosidad  
Deq=4\*Af/Pm # densidad equivalente  
Af=W\*H # area de flujo  
Pm=2\*(W+H) #perimetro mojado

# Constantes cineticas

ka = (3.93 \* U ^ 0.969 / H ^ 1.673) / 24 / 3600 # Constante de reaireacion Churchil  
kr = 3.5 / 24 / 3600 # Constante de remocion de materia carbonacea por reaccion: Bhargava  
kd = 0.2 \* kr # Tasa de remocion de materia carbonaces  
krn = 0.1 \* kr # 0.4 # Tasa de remocion de materia nitrogenada  
kn = 0.2 \* krn # 0.04 # Constante de remocion de materia nitrogenada por reaccion  
k = 0.00001

# Solubilidad del oxigeno en diversos medios

CS1 = exp(-139.34411 + 1.575701E5 / TK - 6.642308E7 / TK ^ 2 + 1.2438E10 / TK ^ 3 - 8.621949E11 / TK ^ 4)  
CS2 = exp(ln(CS1) - S \* (1.7674E-2 - 1.0754E1 / TK + 2.1407E3 / TK ^ 2)) # Revisar esta formula  
CSP2 = CS2 \* P \* ((A / B))  
Cs = CSP2 # Cs = 8.9 # Concentracion de oxigeno saturado  
A = (1 - PWV / P) \* (1 - THETA \* P)  
B = (1 - PWV) \* (1 - THETA)  
PWV = exp(11.8571 - 3840.70 / TK - 216.961 / TK ^ 2)  
THETA = 0.000975 - 1.426E-5 \* T + 6.436E-8 \* T ^ 2  
P = 758 / 760  
T = 20  
TK = T + 273.15  
S = 2 # concentracion de sal



# Coeficiente de difusion

$$E = 5.915 * H * UA * (W / H)^{0.620} * (U / UA)^{1.428} \text{ \# Seo and Cheong}$$

$$E1 = (7.428 + 1.775 * (W / H)^{0.620} * (UA / U)^{0.572} * H * U * (U / UA)) \text{ \# Kashefipour and Falcones}$$

$$t(0) = 0$$

$$t(f) = 20000$$

## MODELO PARA CONTAMINANTE PERMANENTE (CONTINUO)

# Balance de materia de carga organica carbonacea

$$d(L1)/d(t) = -U * (L1 - L0) / DX + E * (L2 - 2 * L1 + L0) / DX^2 - kr * L1 + WC1$$

$$d(L2)/d(t) = -U * (L2 - L1) / DX + E * (L3 - 2 * L2 + L1) / DX^2 - kr * L2 + WC2$$

$$d(L3)/d(t) = -U * (L3 - L2) / DX + E * (L4 - 2 * L3 + L2) / DX^2 - kr * L3 + WC3$$

$$d(L4)/d(t) = -U * (L4 - L3) / DX + E * (L5 - 2 * L4 + L3) / DX^2 - kr * L4 + WC4$$

$$d(L5)/d(t) = -U * (L5 - L4) / DX + E * (L6 - 2 * L5 + L4) / DX^2 - kr * L5 + WC5$$

$$d(L6)/d(t) = -U * (L6 - L5) / DX + E * (L7 - 2 * L6 + L5) / DX^2 - kr * L6 + WC6$$

$$d(L7)/d(t) = -U * (L7 - L6) / DX + E * (L8 - 2 * L7 + L6) / DX^2 - kr * L7 + WC7$$

$$d(L8)/d(t) = -U * (L8 - L7) / DX + E * (L9 - 2 * L8 + L7) / DX^2 - kr * L8 + WC8$$

$$d(L9)/d(t) = -U * (L9 - L8) / DX + E * (L10 - 2 * L9 + L8) / DX^2 - kr * L9 + WC9$$

$$d(L10)/d(t) = -U * (L10 - L9) / DX + E * (L11 - 2 * L10 + L9) / DX^2 - kr * L10 + WC10$$

# Balance de materia de carga organica nitrogenada

$$d(N1)/d(t) = -U * (N1 - N0) / DX + E * (N2 - 2 * N1 + N0) / DX^2 - km * N1 + WN1$$

$$d(N2)/d(t) = -U * (N2 - N1) / DX + E * (N3 - 2 * N2 + N1) / DX^2 - km * N2 + WN2$$

$$d(N3)/d(t) = -U * (N3 - N2) / DX + E * (N4 - 2 * N3 + N2) / DX^2 - km * N3 + WN3$$

$$d(N4)/d(t) = -U * (N4 - N3) / DX + E * (N5 - 2 * N4 + N3) / DX^2 - km * N4 + WN4$$

$$d(N5)/d(t) = -U * (N5 - N4) / DX + E * (N6 - 2 * N5 + N4) / DX^2 - km * N5 + WN5$$

$$d(N6)/d(t) = -U * (N6 - N5) / DX + E * (N7 - 2 * N6 + N5) / DX^2 - km * N6 + WN6$$

$$d(N7)/d(t) = -U * (N7 - N6) / DX + E * (N8 - 2 * N7 + N6) / DX^2 - km * N7 + WN7$$

$$d(N8)/d(t) = -U * (N8 - N7) / DX + E * (N9 - 2 * N8 + N7) / DX^2 - km * N8 + WN8$$

$$d(N9)/d(t) = -U * (N9 - N8) / DX + E * (N10 - 2 * N9 + N8) / DX^2 - km * N9 + WN9$$

$$d(N10)/d(t) = -U * (N10 - N9) / DX + E * (N11 - 2 * N10 + N9) / DX^2 - km * N10 + WN10$$

# Balance de materia del material inorganico

$$d(C1)/d(t) = -U * (C1 - C0) / DX + E * (C2 - 2 * C1 + C0) / DX^2 - k * C1$$

$$d(C2)/d(t) = -U * (C2 - C1) / DX + E * (C3 - 2 * C2 + C1) / DX^2 - k * C2$$

$$d(C3)/d(t) = -U * (C3 - C2) / DX + E * (C4 - 2 * C3 + C2) / DX^2 - k * C3$$

$$d(C4)/d(t) = -U * (C4 - C3) / DX + E * (C5 - 2 * C4 + C3) / DX^2 - k * C4$$

$$d(C5)/d(t) = -U * (C5 - C4) / DX + E * (C6 - 2 * C5 + C4) / DX^2 - k * C5$$

$$d(C6)/d(t) = -U * (C6 - C5) / DX + E * (C7 - 2 * C6 + C5) / DX^2 - k * C6$$

$$d(C7)/d(t) = -U * (C7 - C6) / DX + E * (C8 - 2 * C7 + C6) / DX^2 - k * C7$$

$$d(C8)/d(t) = -U * (C8 - C7) / DX + E * (C9 - 2 * C8 + C7) / DX^2 - k * C8$$

$$d(C9)/d(t) = -U * (C9 - C8) / DX + E * (C10 - 2 * C9 + C8) / DX^2 - k * C9$$

$$d(C10)/d(t) = -U * (C10 - C9) / DX + E * (C11 - 2 * C10 + C9) / DX^2 - k * C10$$

# Balance de materia de deficit de oxigeno

$$d(D1)/d(t) = -U * (D1 - D0) / DX + E * (D2 - 2 * D1 + D0) / DX^2 - ka * D1 + kd * L1 + kn * N1 + SW21$$

$$d(D2)/d(t) = -U * (D2 - D1) / DX + E * (D3 - 2 * D2 + D1) / DX^2 - ka * D2 + kd * L2 + kn * N2 + SW22$$

$$d(D3)/d(t) = -U * (D3 - D2) / DX + E * (D4 - 2 * D3 + D2) / DX^2 - ka * D3 + kd * L3 + kn * N3 + SW23$$

$$d(D4)/d(t) = -U * (D4 - D3) / DX + E * (D5 - 2 * D4 + D3) / DX^2 - ka * D4 + kd * L4 + kn * N4 + SW24$$

$$d(D5)/d(t) = -U * (D5 - D4) / DX + E * (D6 - 2 * D5 + D4) / DX^2 - ka * D5 + kd * L5 + kn * N5 + SW25$$



$$\begin{aligned}d(D6)/d(t) &= -U * (D6 - D5) / DX + E * (D7 - 2 * D6 + D5) / DX^2 - ka * D6 + kd * L6 + kn * N6 + SW26 \\d(D7)/d(t) &= -U * (D7 - D6) / DX + E * (D8 - 2 * D7 + D6) / DX^2 - ka * D7 + kd * L7 + kn * N7 + SW27 \\d(D8)/d(t) &= -U * (D8 - D7) / DX + E * (D9 - 2 * D8 + D7) / DX^2 - ka * D8 + kd * L8 + kn * N8 + SW28 \\d(D9)/d(t) &= -U * (D9 - D8) / DX + E * (D10 - 2 * D9 + D8) / DX^2 - ka * D9 + kd * L9 + kn * N9 + SW29 \\d(D10)/d(t) &= -U * (D10 - D9) / DX + E * (D11 - 2 * D10 + D9) / DX^2 - ka * D10 + kd * L10 + kn * N10 \\&+ SW210\end{aligned}$$

L1(0) = 0 # 40 # Carga organica carbonacea inicial

$$L2(0) = 0$$

$$L3(0) = 0$$

$$L4(0) = 0$$

$$L5(0) = 0$$

$$L6(0) = 0$$

$$L7(0) = 0$$

$$L8(0) = 0$$

$$L9(0) = 0$$

$$L10(0) = 0$$

N1(0) = 0 # 20 # Carga organica nitrogenada inicial

$$N2(0) = 0$$

$$N3(0) = 0$$

$$N4(0) = 0$$

$$N5(0) = 0$$

$$N6(0) = 0$$

$$N7(0) = 0$$

$$N8(0) = 0$$

$$N9(0) = 0$$

$$N10(0) = 0$$

# Deficit inicial de oxigeno a lo largo del flujo

$$D1(0) = 0.2$$

$$D2(0) = 0.2$$

$$D3(0) = 0.2$$

$$D4(0) = 0.2$$

$$D5(0) = 0.2$$

$$D6(0) = 0.2$$

$$D7(0) = 0.2$$

$$D8(0) = 0.2$$

$$D9(0) = 0.2$$

$$D10(0) = 0.2$$

# Concentracion de materia inorganica

$$C1(0) = 0 \# 25$$

$$C2(0) = 0$$

$$C3(0) = 0$$

$$C4(0) = 0$$

$$C5(0) = 0$$

$$C6(0) = 0$$

$$C7(0) = 0$$

$$C8(0) = 0$$

$$C9(0) = 0$$

$$C10(0) = 0$$





# Concentracion instantanea de oxigeno

C1S = Cs - D1  
C2S = Cs - D2  
C3S = Cs - D3  
C4S = Cs - D4  
C5S = Cs - D5  
C6S = Cs - D6  
C7S = Cs - D7  
C8S = Cs - D8  
C9S = Cs - D9  
C10S = Cs - D10

# Carga organica carbonacea difusa

WC1 = 0.00  
WC2 = 0.00  
WC3 = 0.00  
WC4 = 0.00  
WC5 = 0.00  
WC6 = 0.00  
WC7 = 0.000  
WC8 = 0.00  
WC9 = 0.00  
WC10 = 0.00

# Carga organica nitrogenada difusa

WN1 = 0.00  
WN2 = 0.00  
WN3 = 0.00  
WN4 = 0.00  
WN5 = 0.00  
WN6 = 0.00  
WN7 = 0.00  
WN8 = 0.00  
WN9 = 0.00  
WN10 = 0.00

# Fuentes y sumideros (fotosintesis y respiracion)

SW21 = 0  
SW22 = 0.000  
SW23 = 0.00  
SW24 = 0.00  
SW25 = 0  
SW26 = 0  
SW27 = 0  
SW28 = 0.000  
SW29 = 0.00  
SW210 = 0.000

L0 = 40 # 0 # 0 # Carga organica carbonacea aguas arriba

N0 = 20 # 0 # Carga organica nitrogenada carbonacea aguas arriba

D0 = 0.2 # Deficit inicial de oxigeno disuelto

C0 = 25 # 0

# Condiciones de frontera

C11 = C10



$$L11 = L10$$

$$D11 = D10$$

$$N11 = N10$$

# Parametros de flujo

$$U = 0.5 \text{ \# Velocidad del fluido (m/s)}$$

$$H = 1 \text{ \# altura de la corriente de flujo}$$

$$W = 5 \text{ \# ancho del rio}$$

$$UA = (SE * g * H)^{0.5}$$

$$g = 9.81$$

$$SE = 1 / 100 \text{ \# Pendiente}$$

$$DX = 400 \text{ \# Incremento longitudinal}$$

$$Re = dens * U * Deq / Visc$$

$$dens = 1000 \text{ \# densidad}$$

$$Visc = 1E-3 \text{ \# viscosidad}$$

$$Deq = 4 * Af / Pm \text{ \# densidad equivalente}$$

$$Af = W * H \text{ \# area de flujo}$$

$$Pm = 2 * (W + H) \text{ \#perimetro mojado}$$

# Constantes cineticas

$$ka = (3.93 * U^{0.969} / H^{1.673}) / 24 / 3600 \text{ \# Constante de reaireacion Churchil}$$

$$kr = 3.5 / 24 / 3600 \text{ \# Constante de remocion de materia carbonacea por reaccion: Bhargava}$$

$$kd = 0.2 * kr \text{ \# Tasa de remocion de materia carbonaces}$$

$$krn = 0.1 * kr \text{ \# Tasa de remocion de materia nitrogenada}$$

$$kn = 0.2 * krn \text{ \# Constante de remocion de materia nitrogenada por reaccion}$$

$$k = 0.00001$$

# Solubilidad del oxigeno en diversos medios

$$CS1 = \exp(-139.34411 + 1.575701E5 / TK - 6.642308E7 / TK^2 + 1.2438E10 / TK^3 - 8.621949E11 / TK^4)$$

$$CS2 = \exp(\ln(CS1) - S * (1.7674E-2 - 1.0754E1 / TK + 2.1407E3 / TK^2)) \text{ \# Revisar esta formula}$$

$$CSP2 = CS2 * P * ((A / B))$$

$$Cs = CSP2 \text{ \# } Cs = 8.9 \text{ \# Concentracion de oxigeno saturado}$$

$$A = (1 - PWV / P) * (1 - THETA * P)$$

$$B = (1 - PWV) * (1 - THETA)$$

$$PWV = \exp(11.8571 - 3840.70 / TK - 216.961 / TK^2)$$

$$THETA = 0.000975 - 1.426E-5 * T + 6.436E-8 * T^2$$

$$P = 758 / 760$$

$$T = 20$$

$$TK = T + 273.15$$

$$S = 2 \text{ \# concentracion de sal}$$

# Coeficiente de difusion

$$E = 5.915 * H * UA * (W / H)^{0.620} * (U / UA)^{1.428} \text{ \# Seo and Cheong}$$

$$E1 = (7.428 + 1.775 * (W / H)^{0.620} * (UA / U)^{0.572} * H * U * (U / UA)) \text{ \# Kashefipour and Falcones}$$

$$t(0) = 0$$

$$t(f) = 20000$$

## ANEXO 5: TABLAS DE RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA SIMULACIÓN.

R001: C001 C01														
	t	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	N1	N2	N3
1	0	40.	0	0	0	0	0	0	0	0	20.	0	0	0
2	406.9784	22.65677	12.06408	3.21544	0.5715938	0.076224	0.0081328	0.0007232	5.512E-05	3.676E-06	2.185E-07	11.49773	6.122211	1.631753
3	611.4587	17.11335	13.65291	5.459641	1.45695	0.2917449	0.0467494	0.0062437	0.0007149	7.162E-05	6.401E-06	8.749569	6.980343	2.791359
4	817.089	12.94897	13.75129	7.333936	2.612222	0.6984423	0.1494727	0.0266655	0.0040783	0.0005459	6.525E-05	6.67026	7.083548	3.777849
5	1008.001	10.0251	13.07398	8.58209	3.76578	1.240978	0.3274155	0.0720216	0.0135838	0.0022423	0.0003308	5.200189	6.781694	4.451675
6	1236.956	7.402922	11.76863	9.447955	5.076997	2.050296	0.6631633	0.1788787	0.0413772	0.0083777	0.0015179	3.872208	6.155757	4.941893
7	1416.484	5.852639	10.58981	9.705275	5.960972	2.753192	1.018838	0.3144895	0.0832599	0.0192962	0.0040053	3.081413	5.575531	5.109824
8	1648.467	4.335292	9.04767	9.605677	6.846879	3.673396	1.579866	0.5669575	0.1745448	0.047048	0.0113693	2.301917	4.804056	5.100341
9	1840.525	3.391533	7.837477	9.250499	7.34269	4.390628	2.105684	0.8428925	0.2895132	0.0870781	0.0234991	1.813462	4.190719	4.946265
10	2044.847	2.619416	6.66064	8.690376	7.640304	5.065245	2.694874	1.197151	0.4564403	0.1524201	0.0457031	1.411081	3.58809	4.68151
11	2262.978	1.994344	5.549807	7.96644	7.722993	5.652421	3.322223	1.63111	0.6875254	0.2538696	0.0842405	1.082932	3.013555	4.325791
12	2420.27	1.641618	4.844006	7.402765	7.653799	5.979742	3.753739	1.96903	0.8869312	0.3500396	0.1242122	0.896528	2.64543	4.042832
13	2679.955	1.194615	3.844856	6.453894	7.351771	6.338461	4.395037	2.548055	1.269055	0.9539527	0.2175901	0.6586147	2.119745	3.558159
14	2870.993	0.9480563	3.230674	5.77262	7.016543	6.46317	4.791589	2.971585	1.58366	0.739879	0.3112233	0.5263352	1.793583	3.204803
15	3064.868	0.7514757	2.699959	5.115145	6.608977	6.479938	5.117612	3.382682	1.922079	0.9576764	0.4298348	0.4201584	1.509577	2.859934
16	3260.722	0.595549	2.246999	4.49645	6.152804	6.398222	5.36384	3.76554	2.273296	1.203769	0.5744741	0.3353642	1.265325	2.532031
17	3458.573	0.4718722	1.862883	3.923972	5.667823	6.230829	5.527108	4.108066	2.626793	1.473674	0.7454252	0.2676432	1.056617	2.225655
18	3658.436	0.3737818	1.538994	3.401698	5.170921	5.991951	5.607963	4.400444	2.971796	1.76143	0.9416893	0.2135574	0.8792924	1.943534
19	3860.324	0.2959937	1.267271	2.930964	4.675998	5.69622	5.610107	4.63545	3.297892	2.059918	1.160937	0.1703631	0.7293947	1.686955
20	4064.244	0.2343161	1.040356	2.511139	4.194064	5.357953	5.539761	4.80857	3.595571	2.36125	1.399559	0.1358701	0.6032588	1.456105
21	4270.197	0.1854227	0.8516475	2.140191	3.733464	4.99058	5.049992	4.917937	3.856663	2.657195	1.652801	0.1083293	0.4975568	1.250361
22	4478.182	0.1466739	0.6953129	1.815144	3.300163	4.606247	5.215076	4.964133	4.074657	2.939617	1.914987	0.0863433	0.4093137	1.068531
23	4688.192	0.1159738	0.5662546	1.532446	2.89808	4.215577	4.979908	4.949877	4.244895	3.200873	2.179788	0.0687957	0.3359023	0.9090474
24	4900.216	0.091659	0.4600621	1.288249	2.529416	3.827549	4.709488	4.87965	4.364637	3.434163	2.440541	0.0547941	0.2750266	0.7701195
25	5006.978	0.081472	0.4143351	1.179357	2.357914	3.636877	4.564108	4.825328	4.40523	3.538496	2.567304	0.0488942	0.2486569	0.7077734
26	5221.992	0.0643459	0.3355224	0.985518	2.040541	3.266041	4.258787	4.682386	4.448151	3.719597	2.809549	0.0389201	0.2029433	0.5961186
27	5438.973	0.0507953	0.2711432	0.8205757	1.756642	2.913203	3.941163	4.499678	4.4416	3.861042	3.031712	0.030968	0.1653056	0.5002735
28	5657.895	0.0400787	0.2186907	0.6808544	1.504781	2.58194	3.618921	4.284639	4.388643	3.960621	3.228392	0.0246302	0.1343957	0.4184711
29	5878.73	0.0316072	0.1760598	0.563081	1.28303	2.274593	3.298677	4.044726	4.293471	4.017552	3.395113	0.0196811	0.1090717	0.3488371

R001: C001 C01														
	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1									25.					
2	1.631753	0.2900691	0.0386817	0.0041272	0.000367	2.797E-05	1.866E-06	1.109E-07	14.33741	7.634257	2.034759	0.3617095	0.0482352	0.0051465
3	2.791359	0.7448972	0.1491609	0.0239016	0.0031922	0.0003655	3.662E-05	3.273E-06	10.89725	8.693746	3.47653	0.9277405	0.1857741	0.0297685
4	3.777849	1.345605	0.3597808	0.0769962	0.0137359	0.0021008	0.0002812	3.361E-05	8.297394	8.811498	4.699413	1.67385	0.4475453	0.0957786
5	4.451675	1.953373	0.6437164	0.1698359	0.0373588	0.0070461	0.0011631	0.0001716	6.461374	8.426435	5.531324	2.427118	0.7998347	0.2110256
6	4.941893	2.655599	1.072438	0.3468774	0.0935652	0.021643	0.0043821	0.000794	4.804773	7.638281	6.132075	3.295161	1.330719	0.4304177
7	5.109824	3.13845	1.449555	0.5364181	0.1655786	0.0438363	0.0101595	0.0021088	3.819444	6.910931	6.333682	3.890142	1.796739	0.6648961
8	5.100341	3.635498	1.950464	0.8388637	0.3010383	0.0926783	0.0249811	0.0060368	2.849316	5.946466	6.313209	4.500024	2.414286	1.038347
9	4.946265	3.926155	2.34768	1.125914	0.4506367	0.1548034	0.0465609	0.012565	2.242142	5.181354	6.115502	4.85425	2.902643	1.392067
10	4.68151	4.115836	2.72865	1.45173	0.644906	0.2458846	0.0821088	0.0246203	1.742524	4.430882	5.781131	5.082588	3.369571	1.792721
11	4.325791	4.193599	3.063275	1.803973	0.8856958	0.3733275	0.1378516	0.0457427	1.335563	3.71657	5.33493	5.1719	3.785289	2.224812
12	4.042832	4.179928	3.265684	2.050009	1.075336	0.4843749	0.1911652	0.0678353	1.10464	3.259517	4.981299	5.150219	4.023751	2.52588
13	3.58159	4.053176	3.494518	2.42307	1.404793	0.699655	0.305405	0.1199617	0.8102468	2.607771	4.37735	4.986335	4.299058	2.980931
14	3.204803	3.895395	3.588178	2.68016	1.649743	0.8792053	0.4107608	0.1727828	0.6467774	2.204011	3.938163	4.786784	4.409266	3.268889
15	2.859934	3.695152	3.623005	2.861313	1.891295	1.074655	0.5354475	0.2403254	0.5157087	1.852878	3.510326	4.535485	4.446931	3.512019
16	2.520301	3.464752	3.602952	3.020473	2.120442	1.280133	0.6778636	0.3234965	0.4111517	1.55127	3.104234	4.247737	4.417168	3.703057
17	2.225655	3.214757	3.53409	3.134944	2.330071	1.489902	0.8358594	0.4228009	0.3277408	1.293873	2.725411	3.93661	4.327648	3.838876
18	1.943534	2.954366	3.423455	3.204067	2.51416	1.637913	1.00638	0.5380269	0.2611996	1.075452	2.377114	3.613452	4.187189	3.918857
19	1.686955	2.691332	3.278535	3.228972	2.667995	1.898145	1.185613	0.6681927	0.208119	0.8910435	2.060819	3.287787	4.005125	3.944578
20	1.456105	2.431963	3.106853	3.212276	2.788289	2.084922	1.36919	0.8115456	0.1657805	0.7360598	1.776651	2.967333	3.790794	3.919424
21	1.250361	2.181196	2.915639	3.157751	2.8732	2.253173	1.552409	0.9656136	0.132015	0.6063453	1.523746	2.658105	3.55313	3.848178
22	1.068531	1.942725	2.711585	3.069988	2.922264	2.398651	1.730481	1.127306	0.1050918	0.4981914	1.30055	2.364566	3.300374	3.7366
23	0.9090474	1.719142	2.500681	2.954082	2.936267	2.518072	1.898758	1.29305	0.0836293	0.4083291	1.105055	2.089821	3.039874	3.591037
24	0.7701195	1.512093	2.288121	2.815348	2.917071	2.609194	2.052954	1.458963	0.0665247	0.3339061	0.9349916	1.835812	2.777977	3.418075
25	0.7077734	1.415066	2.182616	2.73908	2.895847	2.643732	2.123575	1.540728	0.0593241	0.3016992	0.8587524	1.716922	2.648022	3.323368
26	0.5961186	1.234237	1.97549	2.57596	2.832177	2.690498	2.249827	1.699377	0.047162	0.2459195	0.7223553	1.495605	2.393829	3.121457
27	0.5002735	1.070957	1.776068	2.402776	2.743281	2.707873	2.353929	1.848318	0.0374775	0.2000531	0.6054316	1.296074	2.1494	2.907842
28	0.4184711	0.9247588	1.586724	2.223997	2.633112	2.697028	2.433988	1.983999	0.0297687	0.1624342	0.5057099	1.117688	1.917756	2.687981
29	0.3488371	0.7948561	1.409144	2.04368	2.516768	2.65987	2.488933	2.103323	0.0236362	0.1318538	0.4210601	0.9584226	1.700893	2.466681



R001: C001 C01																
	C7	C8	C9	C10	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	T	THETA
1	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	20.	0.0007
2	0.0004576	3.488E-05	2.326E-06	1.383E-07	0.2772831	0.2401151	0.2093016	0.200105	0.1983825	0.1981458	0.19812	0.1981177	0.1981175	0.1981175	20.	0.0007
3	0.0039758	0.0004552	4.561E-05	4.076E-06	0.2875868	0.2688125	0.2257803	0.2048068	0.1987055	0.1974231	0.1972111	0.1971821	0.1971788	0.1971784	20.	0.0007
4	0.0170866	0.0026133	0.0003498	4.181E-05	0.288383	0.2929931	0.2477151	0.2145576	0.2011346	0.1972861	0.1964253	0.1962671	0.1962423	0.1962389	20.	0.0007
5	0.0464193	0.008755	0.0014452	0.0002132	0.2841954	0.3092697	0.2698734	0.2280213	0.2061238	0.1982063	0.1959937	0.1954875	0.1953893	0.1953727	20.	0.0007
6	0.116099	0.0268553	0.0054374	0.0009852	0.2759724	0.3207847	0.295317	0.2485011	0.216191	0.2014001	0.1962389	0.194774	0.1944224	0.1943494	20.	0.0007
7	0.2052365	0.0543356	0.0125928	0.0026138	0.2684803	0.324419	0.3126464	0.2665177	0.2272033	0.2059808	0.1973681	0.1945416	0.19376	0.1935731	20.	0.0007
8	0.3726256	0.1147174	0.0309217	0.0074723	0.2586034	0.3235297	0.3302331	0.2903534	0.2449189	0.2150196	0.2005679	0.194972	0.1931544	0.1926458	20.	0.0007
9	0.557236	0.1913971	0.0575673	0.0155352	0.2507893	0.3192247	0.3402699	0.3091228	0.2617618	0.2252333	0.2050726	0.1962437	0.1930151	0.1920013	20.	0.0007
10	0.7963854	0.3036395	0.101395	0.0304033	0.2431283	0.3122151	0.3465189	0.3269557	0.2808385	0.2386133	0.2119824	0.1988232	0.1934246	0.1915302	20.	0.0007
11	1.092315	0.460419	0.1700103	0.0564138	0.235828	0.3030012	0.348611	0.3426759	0.3013593	0.2552607	0.2218921	0.2032949	0.194753	0.191413	20.	0.0007
12	1.324954	0.5968133	0.2355406	0.083582	0.2311467	0.2957488	0.3475811	0.3515726	0.3155899	0.2683676	0.2306259	0.2077747	0.1964451	0.1916816	20.	0.0007
13	1.728217	0.8607359	0.3757181	0.1475804	0.2244472	0.2834142	0.3421265	0.3615832	0.336982	0.2910647	0.2476548	0.2176541	0.2008968	0.1930189	20.	0.0007
14	2.027257	1.080395	0.5047559	0.2123209	0.2202757	0.2744658	0.3358137	0.3653211	0.3503752	0.307842	0.2618788	0.2269184	0.2056903	0.1949131	20.	0.0007
15	2.321404	1.319048	0.6572163	0.294979	0.2166287	0.2657551	0.3279992	0.366218	0.3615397	0.324271	0.2773382	0.2379618	0.212002	0.1978051	20.	0.0007
16	2.599632	1.569425	0.8310512	0.3966021	0.2134771	0.2574861	0.3191381	0.3644907	0.3701392	0.3397145	0.2935332	0.250615	0.2199136	0.2018672	20.	0.0007
17	2.853274	1.82445	1.023546	0.5177382	0.2107689	0.2497656	0.3096161	0.3604503	0.3760374	0.3536754	0.3099789	0.2646553	0.2294593	0.2072581	20.	0.0007
18	3.07504	2.076698	1.230892	0.6580546	0.2084533	0.2426567	0.2997662	0.3544501	0.3792205	0.365741	0.3261718	0.2797781	0.2405978	0.2141018	20.	0.0007
19	3.259277	2.318813	1.448369	0.8162779	0.206482	0.2361876	0.2898669	0.3468605	0.3797805	0.3755972	0.3416183	0.2956119	0.2532085	0.2224735	20.	0.0007
20	3.402101	2.543895	1.670603	0.9901987	0.2048104	0.2303605	0.2801432	0.3380495	0.3778956	0.383035	0.3558606	0.3117392	0.2670934	0.2323897	20.	0.0007
21	3.501411	2.745818	1.891836	1.176741	0.2033979	0.2251585	0.2707696	0.3283671	0.3738093	0.3879495	0.3684976	0.3277181	0.2819835	0.2438002	20.	0.0007
22	3.556799	2.91949	2.106235	1.372087	0.2022082	0.2205512	0.2618752	0.3181342	0.3678097	0.3903339	0.379201	0.3431056	0.2975511	0.2565848	20.	0.0007
23	3.569381	3.061016	2.308166	1.571856	0.2012091	0.2164997	0.2535494	0.3076359	0.360211	0.3902685	0.387726	0.3574791	0.3134249	0.2705546	20.	0.0007
24	3.541576	3.167787	2.492463	1.771308	0.2003724	0.2129597	0.2458477	0.297117	0.3513361	0.3879069	0.3939152	0.3704959	0.3292079	0.2854576	20.	0.0007
25	3.513576	3.20768	2.576566	1.86939	0.2000071	0.2113671	0.2422405	0.2919151	0.3465198	0.3893294	0.3961087	0.3763158	0.336939	0.2931654	20.	0.0007
26	3.431932	3.26025	2.72626	2.059245	0.1993689	0.2085071	0.2355197	0.2817346	0.3363213	0.3805343	0.3986894	0.3866051	0.3518321	0.3088825	20.	0.0007
27	3.319922	3.277071	2.848728	2.236837	0.1988378	0.2060424	0.2294514	0.2719678	0.325607	0.373446	0.3989113	0.3948085	0.3656533	0.3246984	20.	0.0007
28	3.182449	3.259699	2.941781	2.397913	0.1983966	0.2039285	0.2240165	0.2627222	0.3146386	0.3649525	0.3968937	0.4007793	0.3780607	0.340236	20.	0.0007
29	3.024561	3.210567	3.00424	2.538794	0.1980311	0.2021233	0.2191844	0.2540728	0.3019645	0.3553476	0.3928122	0.4044471	0.3887626	0.3551184	20.	0.0007

## ANEXO 6. GUIA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Autor (año), edición, editorial, pag.	titulo ingles	Titulo español	Resumen
CLAROS Guerrero, Edith Merygluz, et al. Modelación de la dispersión de contaminantes del agua de la cuenca del Rio Huaura-2017. 2018		Modelación de la dispersión de contaminantes del agua de la cuenca del Rio Huaura-2017. 2018	establece un modelo matemático que realizó mediante la ecuación de advección - difusión unidimensional con coeficiente constante, donde evaluó al aforo del caudal, esto mediante la inyección de un trazador. Se identificó un trayecto del río con flujo uniforme con poca turbulencia y en época de estiaje a avenida también detallan la importancia de tener varios datos experimentales para alzar precisión en la simulación de la ecuación advección, evaluando la concentración química del colorante artificial sea rojo o azul la cual se ha identificado con el fluido. Entonces la variación de la dispersión del contaminante « por el caudal y tipo de fluido, por ello es necesario tomar las muestras en diferentes tramos para poder simular y ver el comportamiento de la ecuación de advección y difusión.
TERCINI, João Rafael Bergamaschi; MÉLLO JÚNIOR, Arisvaldo Vieira. Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê. RBRH, 2016, vol. 21, no 2, p. 338-346.	Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê	Modelo de simulación DO y DBO que integra río y embalse aplicado al río Tietê	El objetivo fue desarrollar un modelo de simulación de DO Y DBO, combinando ríos y embalses, con la aplicación de Microsoft Office Excel para aplicar al río Tietê, se desarrolló en una hoja de cálculo en el Excel en la cual se utiliza las ecuaciones de Streeter Phelps modificado, consistió en la estimación de las concentraciones de OD y DBO a lo largo del río, subdivididas en tramos, y en el embalse, a partir de una concentración inicial y características del sistema como las velocidades del flujo del río, coeficientes de degradación de contaminantes y volúmenes de embalse. En conclusión, se representó infalible a la realidad. La calibración fue satisfactoria por el número de puntos monitoreados en el tramo. Entonces el modelo tiene la posibilidad de adaptarse fácilmente a otras cuencas hidrográficas con características similares, que se llegó a analizar.
RAMOS-RAMÍREZ, Luis Ángel, et al. Simulation of Cr(III) dispersion in the High Bogotá River Basin using the WASP model. Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2020, no 97, p. 30-40.		Simulación de la dispersión de Cr(III) en la cuenca alta del río Bogotá utilizando el modelo WASP	Su objetivo fue realizar la simulación de la dispersión del Cr (III) en un tramo a lo largo de Villapinzón con el modelo WASP, para mostrar la dispersión del contaminante se identificaron 8 zonas de mezcla en dicho tramo, esto para poder tomar medidas de tratamiento. como principal factor se tomaron el flujo, la geometría y coeficiente de dispersión del sistema, se obtuvo un mínimo error con el modelo WASP. Entonces, se demostró que con este modelo se puede obtener resultados más precisos
PÉREZ GARCÍA, Roxana. Estudio del transporte hidrodinámico del nitrato como contaminante de los ríos. 2017. Tesis Doctoral. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.		Estudio del transporte hidrodinámico del nitrato como contaminante de los ríos	para medir la concentración del nitrato en los ríos, resolvió el caso no estacionario unidimensional, con una ecuación de dispersión- advección y reacción del vertido. Para la obtención de este plan, se ofrecieron las teorías sobre los cuales se basa el estudio. Se encuentra la solución en cuadraturas para problemas de tipo parabólico que modelan la concentración del nitrato como contaminante del río, valorando una sola fuente de contaminantes en el semieje derecho. Por tener solución única el problema y así mismo mayor aplicación práctica, solo se ofrece la solución analítica para los casos de índice cero del coeficiente del problema de Riemann. Concluye que el transporte hidrodinámico del nitrato como contaminante en los ríos es un problema cada vez más frecuente y preocupante. Mediante las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, específicamente las ecuaciones de tipo parabólico, lograron modelar de forma idónea la concentración de los contaminantes en los ríos.
The World Bank (2016) <a href="http://data.worldbank.org/products/wdi">http://data.worldbank.org/products/wdi</a>		the work bank 2016	La problemática entre países desarrollados y las que están en vías de desarrollo, es muy notoria, los orígenes de la contaminación en América Latina vienen a ser la parte social, económico, cultural y legislativo. En cambio, los países desarrollados, se orientan en ejecutar planes de vigilancia, protección y recuperación de los Recursos Hídricos, a diferencia de esto, los países en vías de desarrollo, se encuentran con dificultad o trabas legales para realizar el control de vertidos en el recurso hídrico.
QUISPE PRADO, W., et al. Dispersión de contaminantes en cursos de agua: estudios en el río Chumbao, Perú. 2016.		dispersión de contaminantes en cursos de agua. Estudios en el río Chumbao, Perú	que su objetivo es estudiar el modo de dispersión de un contaminante, para lo cual utilizó el método de sustancia traza, la cual se aplicó en un tramo de 100 metros del río Chumbao, en Andahuaylas, Perú. El marcador utilizó una solución de cloruro de sodio, vertido mediante un tubo de vidrio, recolectaron la muestra cada 30 segundos y con ello estimaron la concentración en el punto de vertido, con esto los posibles valores de parámetros de dispersión del contaminante del río, la cual se demuestra que es un modelo de dispersión gaussiana, que representa precisión, así también se describió la utilidad de la sal común como trazador químico de alta eficiencia, la cual se detectó casi instantáneamente en este tramo seleccionado la dispersión de los contaminantes en el río.
CARRASCO Venegas, Luis, et al. Simulación de los procesos de desoxigenación y reoxigenación en aguas contaminadas. Revista Campus, 2020, vol. 25, no 30.	Luis Carrasco Venegas, Luis Castañeda Perez, Jorge Lescano Sandoval, José Iannacone Oliver	Simulación de los procesos de desoxigenación y reoxigenación en aguas contaminadas	Hablamos de simulación cuando el modelo ha sido calibrado adecuadamente, los parámetros supuestos son reemplazados por parámetros reales muchas veces proveniente de deducciones teóricas o de datos experimentales.

Autor (año), edición, editorial, pag.	titulo ingles	Titulo español	Resumen
MATOVILLE, Carlos. Modelo matemático de calidad de agua aplicado en la microcuenca del río Tabacay 'Water quality mathematical model applied in the watershed of the river Tabacay. <i>Revista Kilkana Técnica</i> . Vol., 2017, vol. 1, no		Modelo matemático de calidad de agua aplicado en la microcuenca del río Tabacay 'Water quality mathematical model applied in the watershed of the river Tabacay	concepto: Un modelo matemático es un conjunto de conceptos y ecuaciones que permiten acercarse a la realidad de un fenómeno, aunque los modelos son conceptos con fundamentación teórica la necesidad de herramientas computacionales ha permitido la creación de formulaciones pre- definidas sobre diferentes casos específicos según Paredes (2004), citado por Matoville (2017).
CHINH, Le Van, et al. Estimation of 'Water Environment Capacity in the Cau River Basin, Vietnam using the Streeter-Phelps Model. <i>Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University</i> , 2017, vol. 62, p. 163-169.	Estimation of 'Water Environment Capacity in the Cau River Basin, Vietnam using the Streeter-Phelps Model	Estimación de la capacidad ambiental del agua en la cuenca del río Cau, Vietnam, utilizando el modelo Streeter-Phelps	utilizando el modelo Streeter-Phelps®, se ha establecido el modelo de evaluación de niveles de oxígeno disuelto (OD) y DBO del río Cau, EE. UU. Este modelo simple, estima la capacidad de autolimpieza del río a partir de los efectos de la biodegradación, sedimentación y adsorción. En el flujo del proceso, el efecto de autolimpieza reducirá la concentración de contaminantes orgánicos en el agua. El modelo utilizado en este estudio utilizó el sistema esquemático y las ecuaciones básicas que son para determinar la calidad del agua, incluyendo la carga contaminante de las subcuencas y la carga contaminante descargada directamente al río Cau. Se presentó un modelo útil para estimar la capacidad del medio hídrico en la cuenca, en este caso falta datos e información de entrada, por lo que se tomaron datos de entrada aérea a la lo largo del río Cau que tenía datos de años anteriores, como el fósforo total, nitrógeno total, sólidos suspendidos totales, demanda de oxígeno de carbono y demanda bioquímica de oxígeno. finalmente se evaluó la capacidad ambiental hídrica del río, la cual se ha comparado los resultados con los estándares, donde muestra que excedieron los valores la cual indica que la cuenca está muy contaminada y tiene poca capacidad de autolimpieza, esto indica que el modelo Streeter-Phelps es aplicable para evaluar los niveles de contaminación de la cuenca del río Cau.
RODRIGUEZ Amaya, Jose. <i>Evaluación De Impacto Ambiental En El Recurso Hídrico, Debido A La Producción De La Pasta Base De Cocaína En Un Corregimiento Del Municipio De San Calisto Als</i> . 2019. Tesis Doctoral.	flujiograma de la extracción de la coca_word de tesis	Evaluación De Impacto Ambiental En El Recurso Hídrico, Debido A La Producción De La Pasta Base De Cocaína En Un Corregimiento Del Municipio De San Calisto	Evaluar los impactos ambientales en el recurso hídrico, debido a la producción de la pasta base de cocaína. Entonces se desarrollo un corregimiento del municipio de San Calisto, la cual evaluo los impactos negativos que produce la producción de la pasta básica de cocaína, la cual se da un enfoque mixto, y se obtiene información detallada de los impactos por la producción de este producto, así las consecuencias que se genera son la alteración de los ciclos hidrológicos, deforestación, y contaminación por uso excesivo de componentes químicos.
MINAGRI. Ministerio De Agricultura Y Riego. [Fecha de la consulta: 04 de octubre de 2018]		Ministerio De Agricultura Y Riego	El recurso hidrológico en el Perú necesita de una proyección integral para su utilización, consta de una descarga de aguas residuales anual de 960.5 millones de metros cúbicos, pertenecientes a desagües domésticos 64%, desagües pesqueros al 4.4%, desagües de industrias 5.6%, efluentes de minería 25.4% y 0.2% a efluentes petroleros. Llegando a los cuerpos de agua superficial, ya sean mares, o aguas subterráneas
STEFAN, Heinz G. Oxygen uptake prediction in rivers and streams: A stochastic approach. <i>Journal of Environmental Management</i> [en línea]. 203. 1 de diciembre de 2017. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2019].	Oxygen uptake prediction in rivers and streams: A stochastic approach. <i>Journal of Environmental Management</i>		<b>Oxígeno disuelto (OD):</b> Cantidad de oxígeno que se encuentra en la fase líquida como consecuencia de la disolución del oxígeno atmosférico, expresado en (mg/L) y que depende de la presión y temperatura. Un déficit alto de oxígeno disuelto se refiere a que el agua tiene un alto contenido de carga orgánica, ya sea por aguas residuales.
HIDAYAH, Euis Nurul; SANI, Dellentya; CAHYONUGROHO, Okik Hendriyanto. Research Article Assessment of Surabaya River (Karang Pilang-Gunung Sari Segment) 'Water Quality by Streeter-Phelps Model. 2020	Research Article Assessment of Surabaya River (Karang Pilang-Gunung Sari Segment) 'Water Quality by Streeter-Phelps Model	Artículo de investigación Evaluación de la calidad del agua del río Surabaya (segmento Karang Pilang-Gunung Sari) mediante el modelo Streeter-Phelps	mediante el modelo Streeter-Phelps®, tuvo como objetivo identificar la calidad del agua del río Surabaya y evaluar los parámetros orgánicos de la calidad del agua del río con el modelo Streeter-Phelps. Analizaron el oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) además de los parámetros de pH y temperatura. La muestra la tomaron en el río Surabaya entre el segmento Karang Pilang-Gunung Sari en épocas de avenidas. Utilizaron el modelo Streeter-Phelps para aplicar el modelado de datos. entonces con la comparación entre la medición y el modelado de parámetros orgánicos se concluye que el modelo Streeter-Phelps es apto para monitorear la calidad del agua del río Surabaya.
ATHIRAH, Arifin, et al. <i>Assessment of household greywater discharge from village houses using Streeter-Phelps model in stream</i> . Desalination And 'Water Treatment, 2020, vol. 179, p. 8-18.	Assessment of household greywater discharge from village houses using Streeter-Phelps model in stream	Evaluación de la descarga de aguas grises de las casas de la aldea utilizando el modelo Streeter-Phelps en el arroyo	El modelo de Streeter Phelps conocido como el modelo de curva de hundimiento de oxígeno, también se utiliza para predecir los cambios en la calidad del agua superficial. Grises vertidos en el sistema de drenaje con concentraciones de Oxígeno disuelto





Autor (año), edición, editorial, pag.	titulo ingles	Titulo español	Resumen
MASCHAL Tarekegn, Mekonnen; AMSALU Zomaneh, Truye. Causes and impacts of shankila river water pollution in Addis Ababa, Ethiopia. Environ Risk Assess Remediat. 2018; 2 (4): 21, 2018, vol. 30.	Causes and impacts of shankila river water pollution in Addis Ababa, Ethiopia	Causas e impactos de la contaminación del agua del río Shankila en Addis Abeba, Etiopía	La presencia de diferentes contaminantes tóxicos en el río afecta negativamente a los animales y plantas acuáticos en el medio ambiente circundante. Por lo general, afectan la biota acuática de los macroinvertebrados al alterar el equilibrio y el funcionamiento normales del ecosistema
VILA Luján, Ruth Vitman. Toxicidad de residuos químicos de la elaboración de pasta básica de cocaína sobre renacuajos de <i>Rhinella spinulosa</i> . Ayacucho, 2015. 2017.		Toxicidad de residuos químicos de la elaboración de pasta básica de cocaína sobre renacuajos de <i>Rhinella spinulosa</i> . Ayacucho, 2015.	Para la producción de pasta básica de cocaína (PBC) se emplean productos como gasolina, ácido sulfúrico o clorhídrico, carbonato de sodio, sal, entre otras sustancias tóxicas que constituyen los residuos químicos de pasta básica de cocaína, estos son contaminantes orgánicos e inorgánicos, y son desechados irresponsablemente a los suelos y aguas (Bernex, 2008, citado por Vila, 2017). Estos contaminantes son mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos, los cuales no reciben tratamiento pues son elaboraciones ilegales, además de realizarlo en lugares profundos de la selva.
CÁRDENAS Pestana, Jorge Alberto. Propuesta y análisis de un modelo matemático para la determinación de la calidad del agua de aguas superficiales. 2016. Tesis Doctoral. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.		Propuesta y análisis de un modelo matemático para la determinación de la calidad del agua de aguas superficiales.	discusion: desarrolla el modelamiento matemático de la calidad del agua considerando las demandas bioquímicas de oxígeno carbonosa y nitrogenada, además del déficit de oxígeno que está involucrado en los procesos de dispersión axial, ingreso de fuentes puntuales y procesos de respiración y fotosíntesis en régimen no estacionario. Dicho modelo fue interpretado y llevado al programa desarrollado
CABEZAS Mejía, Edison, et al. Introducción a la metodología de la investigación científica. Universidad de las Fuerzas Armadas : ESPE, 2018. ISBN9789942765444.	metodologia	Introducción a la metodología de la investigación científica	<b>poblacion:</b> Población: El universo está constituido por los cuerpos de agua fluyentes ríos, donde las características hidrodinámicas deben ser conocidas para la aplicación del modelamiento y simulación. Respecto a los contaminantes, está constituido por una amplia gama de concentraciones de dispersión de una mezcla de materia orgánica e inorgánica, con afinidad a los modelos, la cual son aquellos derivados del modelo básico de Streeter-Phelps (Cabezas, Andrade y Torres , 2018).
LOUCKS, Daniel P.; VAN BEEK, Eelco. Water quality modeling and prediction. En <i>Water Resource Systems Planning and Management</i> . Springer, Cham, 2017. p. 417-467.	Water Quality Modeling and Prediction- para introducción	Modelización y predicción de la calidad del agua(LIBRO) leer todo DBON DBOC	Los cuerpos de agua están permanentemente sometidos a diversos tipos de contaminantes, los de carácter inorgánico (sales, ácidos, metales, álcalis, relaves mineros, entre otros) y los orgánicos (residuos domésticos, industriales, agroquímicos, etcétera). Respecto a los contaminantes domésticos, es preocupante las zonas que no cuentan con servicio de alcantarillado, estos residuos son descargados directamente a los cuerpos de agua más cercanos, comúnmente al lecho de los ríos. Estos residuos contienen materia orgánica biodegradable y por ende provocan la disminución del oxígeno disuelto en el agua, afectando negativamente el ecosistema acuático.
MUÑOZ, Marcelo; ALDÁS, M. Sistemas de depuración de aguas residuales. EPN, Quito, Ecuador, 2017.		Sistemas de depuración de aguas residuales	Los niveles de enriquecimiento orgánico / agotamiento de oxígeno (oxígeno bajo) en el agua pueden ocurrir naturalmente durante períodos cortos, pero cuando son extremos o duraderos, pueden enfermar e incluso matar peces y otros animales acuáticos. Las aguas residuales, los tanques sépticos con fugas, la escorrentía de granjas y corrales de engorde y la escorrentía de las calles de la ciudad contienen materiales orgánicos que se descomponen y consumen oxígeno en el agua; la temperatura del agua más alta también reduce los niveles de oxígeno. Estos efectos fueron causados por la introducción de un contaminante orgánico de diferentes fuentes
BRISO RETAMALES, Alejandro Eduardo. Síntesis y caracterización de dióxido de manganeso y silicatos de calcio nano-estructurados con propiedades magnéticas a emplear como adsorbentes de contaminantes inorgánicos desde soluciones acuosas que simulan aguas ácidas de mina. 2017.		Síntesis y caracterización de dióxido de manganeso y silicatos de calcio nano-estructurados con propiedades magnéticas a emplear como adsorbentes de contaminantes inorgánicos desde soluciones acuosas que simulan aguas ácidas de	se refiere a una amplia gama de contaminantes que incluyen metales, retardadores de fuego, cianuro y perclorato (utilizado en el combustible de cohetes) que son venenosos para la vida acuática y las personas. Las descargas industriales o de aguas residuales, la minería, los vertederos y la deposición atmosférica de los gases de escape de los automóviles y las emisiones de las centrales eléctricas de carbón pueden contribuir a altos niveles de sustancias químicas inorgánicas tóxicas en las vías fluviales
MENÉNDEZ Gutiérrez, Carlos; DUEÑAS Moreno, Jaime. <i>Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional</i> Ingeniería hidráulica y ambiental, 2018,		Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional	<b>Demanda bioquímica de oxígeno(DBO):</b> Es la cantidad de oxígeno que se consume para degradar la materia orgánica y se expresa en mg de oxígeno por litro de agua (Menéndez y Dueñas, 2018).

Autor (año, edición, editorial, pag.	titulo ingles	Titulo español	Resumen
SHARMA, Deepshikha; KANSAL, Arun; PELLETIER, Greg. Water quality modeling for urban reach of Yamuna river, India (1999–2009), using QUAL2Kw. Applied Water Science, 2017, vol. 7, no 3, p.		Water quality modeling for urban reach of Yamuna river, India (1999–2009), using QUAL2Kw	Según Chapra, 1997 Citado por Sharma et al. (2017) y Zhen-Gang (2008), basado en la APHA (American Public Health Association), la solubilidad del oxígeno en agua pura se obtiene mediante:
LEI, Hongjun, et al. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and Mazzei air injector in soil-less irrigation systems. Irrigation Science, 2016, vol. 34, no 6, p. 421-430.		Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and Mazzei air injector in soil-less irrigation systems	<b>Oxígeno disuelto saturado:</b> Cantidad máxima de oxígeno que puede ser solubilizada en un cuerpo de agua, expresada en (mg/L) que depende de la presión y temperatura (Lei et al. 2016).
FERIA Díaz, Jhon J.; NADER Salgado, Daniela; MEZA Pérez, Sindy J. Deoxygenation and re-aeration rates of the Sinu river. Ingeniería y Desarrollo, 2017, vol. 35, no 1, p. 8-17.		Deoxygenation and re-aeration rates of the Sinu river	<b>Déficit de oxígeno:</b> Diferencia que existe entre la concentración de saturación de oxígeno y la concentración en cualquier instante, expresada en (mg/L) (Feria et al. 2017).
RIANO Valle, Félix. Antecedentes de la conocida ecuación de Bernoulli. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2020, vol. 41, no 1, p. 71-84.		Antecedentes de la conocida ecuación de Bernoulli	<b>Hidrodinámica:</b> Parte de la hidráulica, trabaja el movimiento de fluido, está definido por un campo vectorial de velocidades correspondientes a las partículas del fluido y de un campo escalar de presiones, que corresponden a diferentes puntos del mismo y que es manejado por el Principio de Bernoulli
LARIOS, Fernando; GONZÁLEZ, Carlos; MORALES, Yennyfer. Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. Saber y hacer, 2016, vol. 2, no 2, p. 8-25.		Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú	Las sustancias orgánicas e inorgánicas, contaminan el agua. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), el contaminar el agua, es un peligro para la Salud Pública, la preocupación de contaminar el agua, es la presencia de altos niveles de arsénico inorgánico, plomo y cadmio por las consecuencias, tales como cáncer, enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus, etcétera. En los distritos de Lima, La Oroya y Juliaca, el nivel de concentración del arsénico inorgánico fue de 13 a 193 microgramos por litro para las aguas superficiales y subterráneas, que según lo recomendado por la OMS es el más alto que el límite de 10 microgramos por litro.
ALBERS, Michael J. Quantitative data analysis - In the graduate curriculum. Journal of Technical Writing and Communication, 2017, vol. 47, no 2, p. 215-233.		Quantitative data analysis—In the graduate curriculum	Todos los datos utilizados tienen correlación desde las variables, hipótesis con los resultados (Albers, 2017).
LÓPEZ Jiménez, Petra Amparo. La modelación de la dispersión de contaminantes en medios receptores. 2016	video:características de modelo simulación	La modelación de la dispersión de contaminantes en medios receptores.	se puede utilizar el modelo, antes de ir al medio receptor, en caso de que ya ocurre una emisión o descarga en el medio receptor, se puede conocer para poder controlarla, pero poco se puede hacer cuando la dispersión ya está en ese medio, el modelo se puede aplicar en medios fluidos como el aire, y el agua, que se dispersan en el medio. Los modelos de dispersión se pueden utilizar para analizar el problema, estos son representaciones de la realidad que sirven a los gestores, para tomar decisiones en el tiempo y espacio, sobre como evolucionar en el medio receptor. Tipos: Modelos físicos: Modelos matemáticos:
QUIÑONES Huatangari, Lenin, et al. Empleo del Modelo Streeter-Phelps para estimar el oxígeno disuelto del Río Utcubamba. Ecuatorian Science Journal, 2020, vol. 4, no 2, p. 12-16.		Empleo del Modelo Streeter-Phelps para estimar el oxígeno disuelto del Río Utcubamba	Como objetivo de la investigación fue emplear el modelo Streeter-Phelps para estimar el oxígeno disuelto del Río Utcubamba, el método se realizó mediante un orden. Utilizaron datos reportados y documentados, eligieron puntos de muestreo, tomadas del cauce del río en épocas lluviosas, calcularon la distancia entre los muestreos, seleccionaron punto de muestreo donde se podría aplicar la modelación matemática, se seleccionó las variables para estimar el OD con el modelo Streeter y Phelps, luego se utilizó el software Matlab 2017a, para la simulación de los datos de OD, y por último se utilizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con un programa estadístico, para los residuos entre los datos reales y el calculado. En conclusión, las predicciones del comportamiento de OD de la investigación son fiables. Por otra parte, el manejo de la modelación matemática ofrece futuros modelos para predecir parámetros de OD para todo río.
COSTA Barros Jessyca. Aplicação da teoria Fuzzy no modelo de Streeter-Phelps para o cálculo do risco de contaminação das águas de rios, em função da temperatura. 2016.	Aplicação da teoria Fuzzy no modelo de Streeter-Phelps para o cálculo do risco de contaminação das águas de rios, em função da t.	APLICACIÓN DE LA TEORÍA FUZZY EN EL MODELO STREETER-PHELPS PARA EL CÁLCULO DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA, EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA	conceptos streeter phelps: La introducción de materia orgánica en un cuerpo de agua da como resultado el consumo de oxígeno disuelto en la respiración de las bacterias descomponedoras al realizar los procesos de estabilización de la materia orgánica. La autodepuración es un proceso natural, en el que cargas contaminantes, desde orgánicos, liberados en un cuerpo de agua se neutralizan. Este proceso se debe a la asociación de varios procesos físicos (dilución, sedimentación y atmosférica), química y biológica (oxidación y descomposición) (Andrade, 2010, citado por Costa, 2016). En el proceso de autodepuración, existe un equilibrio entre las fuentes de consumo y producción de oxígeno



Autor (año), edición, editorial, pag.	titulo ingles	Titulo español	Resumen
COSTA Chaves, Larissa, et al. <i>Análise da autodepuração no riacho caraibeirinhas através do modelo matemático de Streeter-Phelps</i> . 2017.		Análise da autodepuração no riacho caraibeirinhas através do modelo matemático de Streeter-Phelps	Este modelo fue desarrollado para el Río Ohio en Estados Unidos, en el año 1995, este modelo muestra el comportamiento del Oxígeno disuelto y la demanda Bioquímica de oxígeno a lo largo de un río, la cual permite evaluar los impactos ambientales causados por contaminantes según (Costa, 2017).
KUMARASAMY, M. V. Deoxygenation and Reaeration Coupled hybrid Mixing cells Based Pollutant Transport Model to Assess water Quality Status of a River. International journal of environmental research, 2015, vol. 9, no 1, p. 341-350.	Deoxygenation and Reaeration Coupled hybrid Mixing cells Based Pollutant Transport Model to Assess water Quality Status of a River		Kumarasamy (2015), en su artículo: "Deoxygenation and Reaeration Coupled Hybrid Mixing Cells Based Pollutant Transport Model to Assess water Quality Status of River", analiza el modelo de Streeter-Phelps modificado, donde considera un modelo híbrido de flujo continuo y uno de dos sistemas semicontinuos. El sistema de ecuaciones diferenciales generado es resuelto usando un método analítico. Las curvas obtenidas en el presente trabajo, considerando el modelo advección-reacción son bastante similares. Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados
PRADANA, Hendra Andiananta, et al. Analysis of deoxygenation and reoxygenation rate in the Indonesia River (a case study: Bedadung River East Java). En IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. p. 012006.	Analysis of deoxygenation and reoxygenation rate in the Indonesia River (a case study: Bedadung River East Java)	Análisis de la tasa de desoxigenación y reoxigenación en el río Indonesia (un estudio de caso: río Bedadung, Java Oriental)	<b>Desoxigenación:</b> Es el proceso en el cual se consume oxígeno para degradar la materia orgánica presente en el cuerpo de agua (Pradana, 2019).
TREERANUT, Srisunont; CHAYARAT, Srisunont; SITTICHA, Tantanasarit. Using STELLA Software for Water Quality Modeling.	Using STELLA Software for Water Quality Modeling	Uso del software STELLA para modelar la calidad del agua	<b>Reoxigenación:</b> Es el proceso en el cual la tasa de disolución de oxígeno en el agua se incrementa como consecuencia de la pérdida de materia orgánica por oxidación de la misma (Treeranut, 2016).
HERRERA Vega, Héctor Alexis. Contaminación del agua superficial por un ingenio azucarero y su impacto en el medio ambiente en Andahuasi 2017.		Contaminación del agua superficial por un ingenio azucarero y su impacto en el medio ambiente en Andahuasi 2017	<b>Dispersión:</b> Se refiere al esparcimiento físico de materia en un medio. Es la acción de dividir o repartir (Herrera, 2017).
GOMES zuin, Vânia; MOTTA boronove, Carolina. Environmental Education In Distance Learning In Environmental Engineering At Federal University Of São Carlos, Brazil: Potentialities And Limitations Towards A Critical Techno-Scientific Education. Brazilian Journal Of Science And Technology, 2016, Vol. 3, No 1, P. 1-14.		Environmental education in distance learning in Environmental Engineering at Federal University of São Carlos, Brazil: potentialities and limitations towards a critical techno-scientific education	Los resultados del programa REOX1.pol desarrollado en este trabajo en base al modelo básico de Streeter-Phelps usando los procedimientos analítico y numérico son similares al obtenido por (Brenner et al. 2005, citado por Gomes y Motta, 2016). en el trabajo denominado: "Aplicaciones of mathematical software packages for modelling and Simulations in Environmental Engineering Educación", donde se reporta las curvas de la demanda bioquímica de oxígeno, déficit de oxígeno, concentración de oxígeno, el tiempo crítico, el déficit crítico y el factor de depuración; no toma en cuenta la variación de la solubilidad respecto a la presión y al contenido de sal, como si se hace en este trabajo de investigación desarrollado.
TACILLO Yauli, Elvis Fernando. Metodología de la investigación científica. 2016.		Metodología de la investigación científica	Nivel de investigación. Su nivel es correlacional, pues relaciona las variables, dependiente e independientes, es decir en la relación causa-efecto (Tacillo, 2017).
OTERO Ortega, Alfredo. Enfoques de investigación. Extraído de <a href="https://www.researchgate.net/profile/alfredo_otero_ortega/publication/326905435_enfoques_de_investigacion_tabla_de_contenido_contenido/link/s15b6b7f9992851ca650526dfd/enfoques-deInvestigacion-Tabla-DeContenido-Contenido.pdf">https://www.researchgate.net/profile/alfredo_otero_ortega/publication/326905435_enfoques_de_investigacion_tabla_de_contenido_contenido/link/s15b6b7f9992851ca650526dfd/enfoques-deInvestigacion-Tabla-DeContenido-Contenido.pdf</a> el, 2018, vol. 14.		Enfoques de investigación	Tipo de investigación. Por el propósito o finalidad, es una investigación aplicada con enfoque mixto se trabaja con datos experimentales de fuentes secundarias que implica una recolección, análisis e interpretación de datos cualitativos y cuantitativos que se ha considerado necesarios para el estudio como los valores de los parámetros cinéticos reportados en la literatura. Según la naturaleza de la información que se recoge para responder al problema de investigación (Otero, 2018).
VILLASÍS Keever, Miguel Ángel; MIRANDA Novales, María Guadalupe. El protocolo de investigación IV: las variables de estudio. Revista Alergia México, 2016, vol. 63, no 3, p. 303-310.	variable dependiente e independiente	El protocolo de investigación IV: las variables de estudio	<b>VARIABLE DEPENDIENTE.</b> - Se describe como de principal interés, de desenlace, resultado o predicha, la variable dependiente cambia en respuesta a la independiente, es decir es el resultado o efecto de las variables independientes La variable independiente es como la variable predictora o que el investigador manipula, es la variable de causalidad para así lograr llegar a la variable dependiente

Autor (año), edición, editorial, pag.	titulo ingles	Titulo español	Resumen
ROBBINS, Stephen P.; COULTER, Mary. Management 13E. Pearson India, 2017.		Management 13E	<b>DIMENSION.</b> - Se denominan como sub variables. En general especifican la conducta de la variable en estudio, tomando como referencia
CARBALLO Barcos, Miriam; GUELMEs valdés, Esperanza. Algunas consideraciones acerca de las variables en las investigaciones que se desarrollan en educación. Revista Universidad y Sociedad, 2016, vol. 8, no 1, p. 140-150.		Algunas consideraciones acerca de las variables en las investigaciones que se desarrollan en educación	Es la cuantificación o la traducción numérica de las dimensiones, se representan de forma clara, para entender cómo se comportan las dimensiones y por ende la variable de interés
Amarilla, R. Modelamiento matemático del contenido de oxígeno disuelto en el brazo aña cua, aguas abajo de la represa de Yacireta. Tesis de maestría en eco-hidrología, Universidad de Buenos Aires, Argentina.(2017)		Modelamiento matemático del contenido de oxígeno disuelto en el brazo aña cua, aguas abajo de la represa de Yacireta.	<b>ecuaciones de las tasas de desoxigenación</b>
Ordúz, L. Determinación y comparación de la tasa de reaeración de los ríos molinos, torca, arzobispo y de la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá mediante la aplicación de ecuaciones empíricas. Facultad de Ingeniería Ambiental-Universidad Santo Tomas, Colombia.(2016).		Determinación y comparación de la tasa de reaeración de los ríos molinos, torca, arzobispo y de la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá mediante la aplicación de ecuaciones empíricas	<b>Ecuaciones de las tasas de reaeración</b>
FERNANDEZ, bedoya Victor Hugo. Tipos de justificación en la investigación científica. Espíritu Emprendedor TES, 2020, vol. 4, no 3, p. 65-76.		Tipos de justificación en la investigación científica.	Un estudio cuenta con justificación practica cuando su desarrollo ayuda a resolver un problema o al menos propone estrategias que al ponerse en práctica contribuirán a su solución
Cádiz, J. <i>Rigurosidad científica y principios orientadores para el evaluador/investigador</i> . 2016.		RIGUROSIDAD CIENTIFICA	es veritativo, dado que hemos sido rigurosas en la búsqueda de la verdad, para obtener resultados verídicos, se han controlado factores que pudieran interferir en la transparencia e interpretación de los resultados. Sobre la aplicabilidad, se han cautelado los factores del modelo para que puedan ser aplicados a otros estudios en condiciones similares. El modelo y los resultados tienen consistencia, puede aplicar el modelo a casos similares esperando resultados similares, además se puede observar la similitud en el perfil de los gráficos obtenidos y sobre la neutralidad se garantiza que los resultados sean producto del desarrollo riguroso de la investigación y no de los intereses personales.
BERNARDO, C.; CARBAJAL, Y.; CONTRERAS, V. Metodología de la investigación: Manual del estudiante. Perú: Universidad de San Martín de Porres, 2019.		Metodología de la investigación: Manual del estudiante. Perú:	En la presente investigación las técnicas de recolección de datos que utilizamos es un análisis documental en el cual se elige los parámetros que se va a utilizar para la simulación



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**


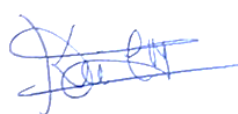
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Declaratoria de Originalidad de los Autores**

Nosotros, CERNA MENDEZ KATHERIN KEI, RODRIGUEZ PACHECO MARY JUANA estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: " MODELAMIENTO Y SIMULACION DE LA DISPERSIÓN DE UNA MEZCLA DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS EN UN RÍO.", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
RODRIGUEZ PACHECO MARY JUANA <b>DNI:</b> 71249175 <b>ORCID</b> 0000-0002-5136-1266	
CERNA MENDEZ KATHERIN KEI <b>DNI:</b> 46844402 <b>ORCID</b> 0000-0001-8549-9020	

Código documento Trilce: INV - 0143748